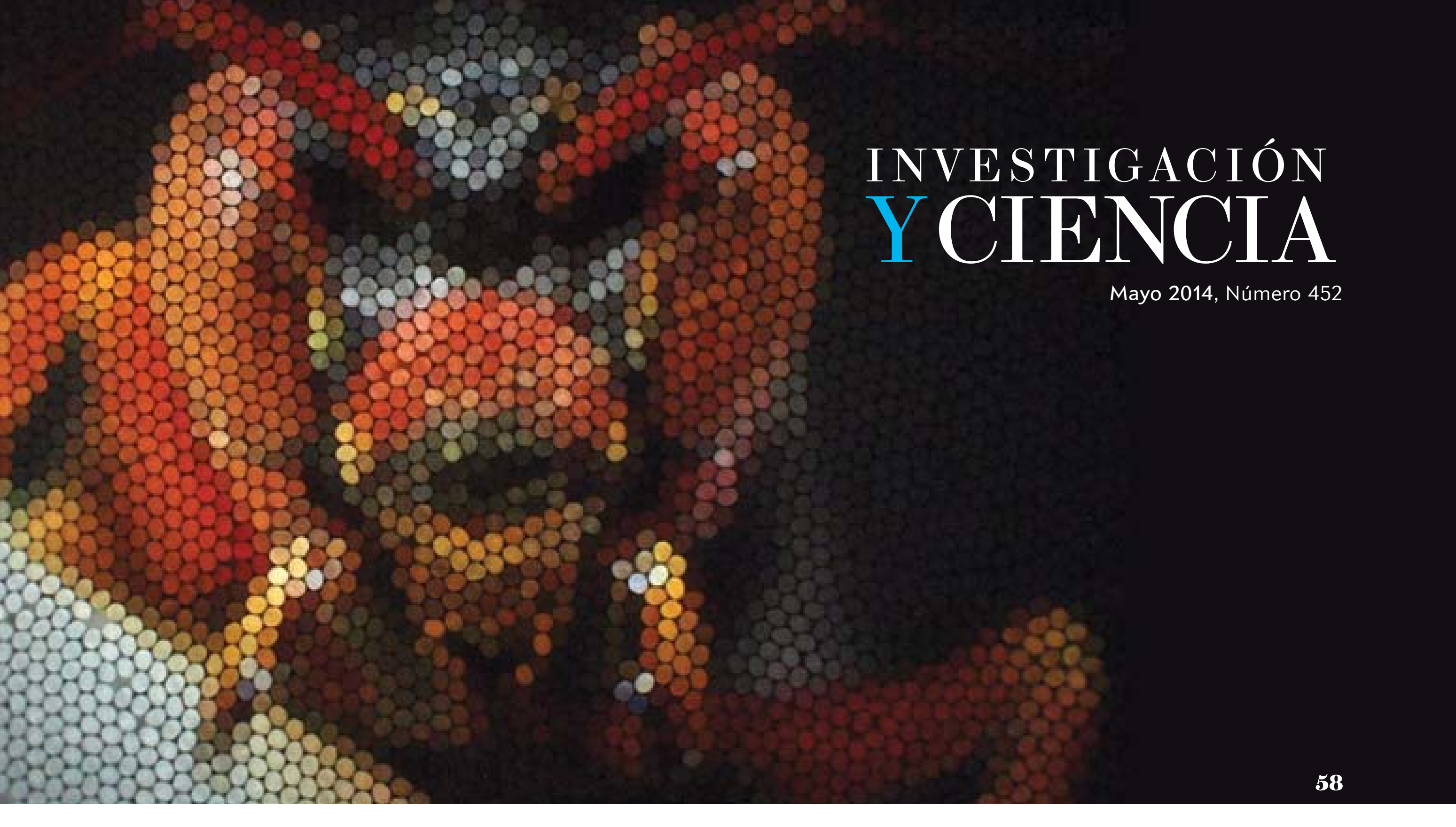
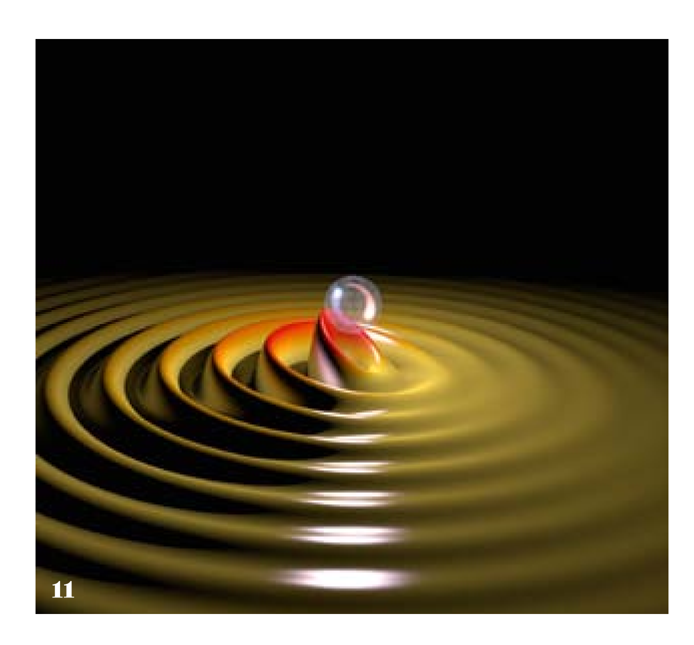

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Mayo 2014 InvestigacionyCiencia.es
Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN
MEDICINA
Avances en terapia génica
COSMOLOGÍA
Galaxias enanas en la red cósmica
ARQUEOLOGÍA
El Renacimiento en los jardines de Al-Ándalus
El siglo del cerebro
Nuevas técnicas de observación y control neuronal arrojan luz sobre el órgano más complejo
INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
EL SIGLO DEL CEREBRO | TERAPIA GÉNICA | GALAXIAS ENANAS EN LA RED CÓSMICA
N.° 452
MAYO 2014
00452
9 770210 136004
6,50 EUROS



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Mayo 2014, Número 452

ARTÍCULOS

CORTESÍA DE ADRIAN G. DYER Y ELIZABETH A. TIBBETTS



11



41



84

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA



Las técnicas que se utilizan para investigar el cerebro son demasiado groseras o bien demasiado precisas para conocer en profundidad el modo en que la actividad de las neuronas da lugar a la percepción y al pensamiento. La necesidad de desarrollar mejores métodos que registren o modifiquen los circuitos cerebrales se ha convertido en una prioridad reciente de la neurociencia. Imagen de Bryan Christie.

redaccion@investigacionyciencia.es



Diciembre 2013

ONDAS GRAVITACIONALES

El artículo «Cómo oír la gran explosión», de Ross D. Andersen [Investigación y Ciencia, diciembre de 2013], presenta varias líneas de investigación encaminadas a desarrollar futuros detectores espaciales de ondas gravitacionales. No obstante, en él no se menciona el proyecto eLISA, uno de los principales candidatos a convertirse en la próxima gran misión de la ESA. eLISA es un descendiente de la Antena Espacial de Interferometría Láser (LISA), uno de los proyectos mencionados en el artículo. Además, la agencia europea ha invertido importantes recursos en la misión LISA Pathfinder, cuyo lanzamiento está previsto para 2015. Esta intentará demostrar la madurez de la técnica y brindará a Europa la oportunidad de liderar la primera búsqueda espacial de ondas gravitacionales. No existe en la actualidad ningún proyecto que pueda considerarse competidor de dicha misión.

Por otro lado, puede que el método basado en interferometría atómica descrito en el artículo llegue algún día a convertirse en una alternativa viable. Por el momento, sin embargo, no reviste en absoluto el grado de madurez necesario para considerarse competidor de eLISA.

John Mather
Robin Stebbins
Centro Goddard de Vuelos Espaciales de la NASA

Aunque el artículo de Andersen resulta entretenido, proporciona una imagen distorsionada y mal informada del estado actual de la astronomía de ondas gravitacionales. Afirmar que las ambiciones de LIGO son «limitadas» y que el experimento no constituye más que un primer paso en la carrera por desarrollar interferómetros espaciales es simplemente inexacto. LIGO y LISA han sido concebidos para operar en frecuencias muy distintas y para detectar fuentes muy dispares de ondas gravitacionales. Cada uno nos mostrará aspectos diferentes del universo.

Con todo, la mayor tergiversación del artículo consiste en presentar la interferometría atómica como una alternativa a LISA. No puede establecerse ninguna comparación sensata entre una y otra. Las técnicas en las que se basa LISA llevan siendo estudiadas y publicadas en revistas con revisión por pares desde hace veinte años. A ello debe sumarse un programa activo y exitoso encaminado a desarrollar la tecnología necesaria, tanto en Europa como en Estados Unidos. La interferometría atómica se encuentra en un estado de madurez muy inferior, pues aún se están debatiendo los principios de diseño básicos. Aunque es importante proseguir con tales investigaciones, todavía queda un abismo para convertir esos ensayos de laboratorio en un detector espacial de ondas gravitacionales.

David Reize
Director ejecutivo del laboratorio LIGO
Instituto de Tecnología de California

Gabriela González
Portavoz de la Colaboración Científica LIGO
Universidad de Luisiana

INFLEXIÓN ENERGÉTICA

En «Calentamiento viscoso» [Investigación y Ciencia, septiembre de 2013], David Biello refiere los esfuerzos para detener la construcción del oleoducto Keystone XL. Al aumentar la producción de combustible a partir de las arenas bituminosas de Alberta, el proyecto aceleraría la acumulación atmosférica de emisiones de carbono, las cuales no deberían superar el billón de toneladas métricas si se desea evitar que el aumento de la temperatura global supere los dos grados Celsius. El artículo señala que, para impedirlo, las emisiones deberían disminuir en un 2,5 por ciento anual a partir de ahora; de lo contrario, dicho umbral se alcanzaría en 2041.

Esa merma anual equivaldría a reducir en un 50 por ciento la energía obtenida a partir de carbono de aquí a treinta años. Una manera de lograrlo sería cercenar la economía mundial a la mitad de su tamaño actual. Nadie estará dispuesto a llevar a cabo semejante medida; al menos, no hasta que la economía global colapse como consecuencia de un calentamiento atmosférico fuera de control.

El objetivo requerirá una innovación y cooperación internacionales sin precedentes. Eso solo ocurrirá cuando la mayoría más rica del mundo desarrollado se dé cuenta de que respira el mismo aire que la población más pobre. A la vista de la historia del comportamiento humano, semejante objetivo se antoja muy improbable.

Tom Faulkner

Hace cuarenta años que vengo observando cómo los ambientalistas se oponen a las centrales hidroeléctricas, a la energía nuclear, a la extracción de petróleo en mar abierto, a la explotación continental de gas natural e incluso a proyectos eólicos. Esos actos, más centrados en perseguir «propósitos puros» que en evaluar las «consecuencias de las acciones», han espoleado la construcción de centrales de carbón muy contaminantes y han llevado a que las compañías petrolíferas inviertan miles de millones en los yacimientos bituminosos de Alberta.

Los últimos avances en fracturación hidráulica han reducido las emisiones de carbono a medida que numerosas instalaciones abandonaban el carbón en favor del gas natural, mucho más barato. La posibilidad de emplear gas natural como combustible de automoción limitaría las emisiones aún más. Por desgracia, dado que la fracturación hidráulica no forma parte de la agenda de algunos fanáticos, todos esos beneficios ambientales habrán de enfrentarse a una fiera oposición.

Robert Gallant
Midland, Michigan

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



ENJAMBRE: Algunas especies de hormigas construyen balsas y puentes vivientes, como este tendido por *Eciton burchelli*.

ENTOMOLOGÍA

Un pontón de larvas

Un viejo proverbio afirma que «para la hormiga, el rocío es una inundación». Sin embargo, para las hormigas que medran en las llanuras aluviales el rocío no es nada. Cuando se produce una crecida del río, algunas especies abandonan los hormigueros en balsas improvisadas que flotan hasta tierra firme. La conducta de enjambre es común en estos insectos: algunas especies llegan incluso a construir puentes vivientes para que sus congéneres puedan subir encima.

La construcción de balsas no es una práctica novedosa; ya se había observado anteriormente en las hormigas de fuego. Pero investigadores de la Universidad de Lausana han descubierto en otra especie un peculiar diseño, consistente en la utilización de balsas vivientes en las que los individuos más jóvenes conforman la base. En realidad, el uso de las pupas a modo de flotadores no pone en peligro a la descendencia de la colonia, como pudiera pensarse.

La hormiga *Formica selysi* habita en las llanuras aluviales de los Pirineos y los Alpes. La reina vive entre 10 y 15 años y a lo largo de su vida sufre una media de dos o tres diluvios de dimensiones bíblicas. Ante la crecida, las obreras apilan la prole (huevos, larvas y pupas) y sobre ella se encaraman tres o cuatro capas de obreras que sujetan la estructura con las mandíbulas. La reina embarca en el centro de la balsa, el lugar más protegido.

A primera vista, no parece buena idea ubicar la descendencia en el fondo, donde el riesgo de ahogamiento es mayor. Al fin y al cabo son, junto con la reina, los miembros más valiosos de la colonia, cuya perpetuación depende de ellos. «Por lógica debería situarse a las crías en medio de la balsa, con la reina», explica Jessica Purcell, la estudiante posdoctoral que dirigió el estudio.

Purcell y sus colaboradores recrearon en el laboratorio las condiciones de inundación con hormigas *F. selysi* recolectadas a orillas del Ródano, a su paso por Suiza. Ante la amenaza, todas las hormigas compusieron las balsas; las que no disponían de crías utilizaban obreras en sustitución. Cuando las aguas regresaron a su cauce, la almadía formada por obreras presentaba un mayor número de ejemplares convalecientes y tardaron más en recuperarse, lo que explicaría por qué estas hormigas se sirven de las crías como flotadores.

Para sorpresa de todos, los huevos y las larvas parecieron no verse afectados después de su acuática función. Aquellos que conformaron el fondo de la balsa registraron una tasa de supervivencia igual a la del grupo de control que permaneció a salvo en tierra firme. La gran flotabilidad de las crías, posiblemente debida a su alto contenido en grasas, impide su hundimiento cuando soportan el peso de los progenitores. Así que en el mundo de las hormigas los retoños no son una carga, sino más bien los padres.

—Anne Sneed

ALEX WILD

FARMACOLOGÍA

Marihuana contra las convulsiones

Cada vez más epilépticos recurren a una medicina alternativa para paliar las crisis convulsivas. La hierba en cuestión no es otra que *Cannabis sativa*. Entre los usuarios, se hallan algunos de los casi 100.000 niños estadounidenses que sufren «epilepsia refractaria», resistente a los antiepilépticos habituales. Algunos padres aseguran que la marihuana ayuda a controlar las convulsiones de sus hijos cuando los fármacos al uso fracasan.

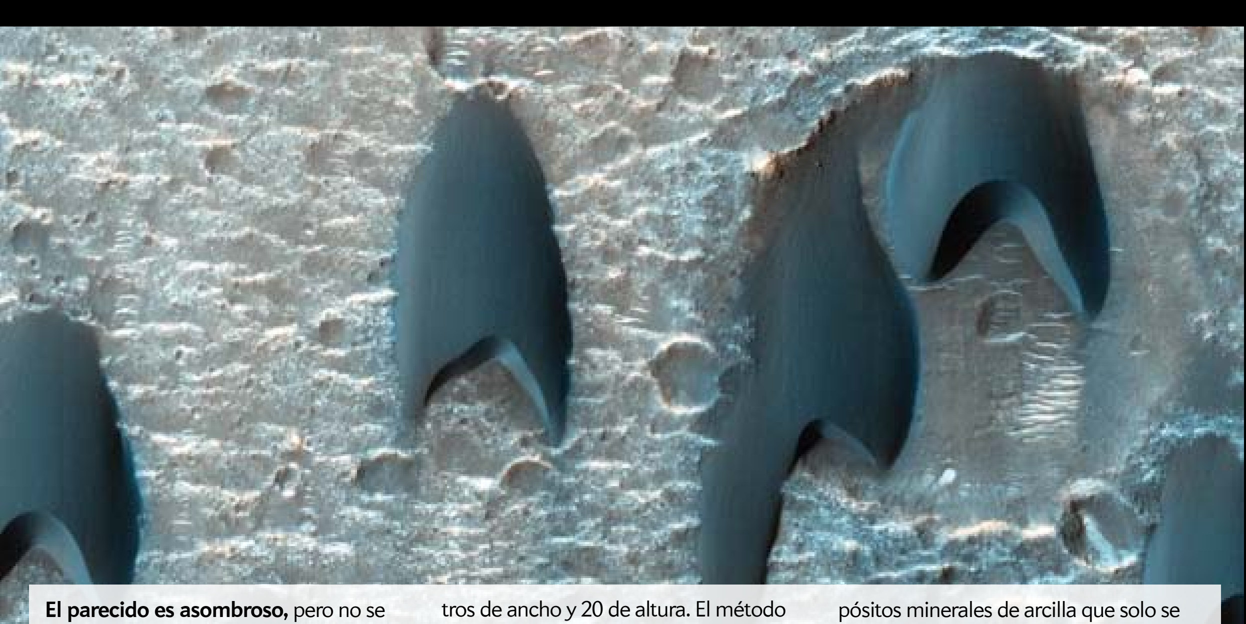
No existe ningún preparado farmacéutico de cannabis que se comercialice como medicamento. Para ayudar a sus hijos, los padres deben comprar la hierba en uno de los llamados dispensarios de marihuana medicinal, o conseguirla de forma ilegal.

El aislamiento de una sustancia de la marihuana presumiblemente capaz de paliar las crisis epilépticas podría cambiar pronto esta situación. El cannabidiol es un compuesto purificado del cannabis que ha suscitado expectativas para el tratamiento de la epilepsia, tanto en adultos como en niños. Fuente de otras virtudes de la marihuana medicinal, constituye el principio activo principal de un nuevo fármaco en fase de desarrollo, Epidiolex, fabricado por GW Pharmaceuticals. Epidiolex contiene otros cannabinoides pero no el tetrahidrocannabinol, responsable de la euforia.

Como en el caso de otros medicamentos autorizados contra la epilepsia, los investigadores no saben con certeza qué convierte al cannabidiol en anticonvulsivo, pero sea cual sea su base fisiológica, parece que funciona. Los ensayos con animales y los estudios preliminares con adultos indican que reduce las convulsiones y resulta bien tolerado y seguro.

En estos momentos el cannabidiol empieza a probarse en niños con epilepsia refractaria. Mediante un ensayo clínico se estudiará si es capaz de mitigar la actividad epiléptica en 150 niños que no responden a la medicación estándar. La confirmación de la eficacia de Epidiolex sería otra prueba más del filón que la marihuana puede suponer para el desarrollo de nuevos fármacos. *—Anne Sneed*

¿QUÉ ES ESTO?



El parecido es asombroso, pero no se trata del emblema de la Flota Estelar de *Star Trek* estampado en la superficie de Vulcano. Esta imagen, captada por la sonda *Mars Reconnaissance Orbiter*, de la NASA, muestra un campo de dunas marciano. Al soplar con intensidad en una misma dirección, las corrientes de viento del planeta rojo moldearon estos barjanes de arena basáltica: dunas con forma de media luna, de unos 200 metros de ancho y 20 de altura. El método empleado para tomar las imágenes —con los colores desplazados hacia el infrarrojo— las muestra azules; sin embargo, a simple vista se nos aparecerían como montículos grises sobre el fondo bermejo del planeta vecino.

Este grupo de barjanes se encuentra a 23° de latitud norte y justo al oeste del valle de Mawrth, uno de los más antiguos de Marte, famoso por contener depósitos minerales de arcilla que solo se forman en presencia de agua. Por extravagantes que parezcan, esta clase de dunas no son extrañas en nuestro planeta. Los barjanes abundan en desiertos como los de Nuevo México, Namibia o Turkestán, donde el naturalista ruso Alexander von Middendorff incorporó estas formaciones a la bibliografía científica con el nombre de *barján*, voz que tomó prestada de una lengua local. *—Anne Sneed*

CORTESÍA DE LA NASA, EL LABORATORIO DE PROPULSIÓN A CHORRO Y LA UNIVERSIDAD DE ARIZONA



CALENTAMIENTO GLOBAL

Volcanes pequeños, pero poderosos

El día de san Valentín, un volcán de Indonesia, el Kelud, explotó por los aires y cubrió de ceniza aldeas situadas a 500 kilómetros de distancia. Al mismo tiempo, inyectó una pequeña, pero significativa, cantidad de dióxido de azufre en la estratosfera, hasta una altura de 28 kilómetros. Las gotas diminutas de ácido sulfúrico reflejaban allí la luz solar que les llegaba, ayudando a enfriar el planeta. Esas «pequeñas» erupciones —como las de Manam, Soufrière Hills, Jebel at Tair y Eyjafjallajökull, por nombrar unas pocas de las 17 registradas entre 2000 y 2012— han contribuido en la disminución del ritmo del calentamiento global, según un trabajo publicado en *Nature Geoscience*.

«El repunte del vulcanismo a principios del siglo XXI ha contribuido claramente en la interrupción de la tendencia previa», según el científico de la atmósfera Benjamin Santer, del Laboratorio Nacional Lawrence en Livermore y autor principal del artículo. Este efecto no es solo atribuible a los volcanes. También ha influido una inusualmente baja actividad solar, la contaminación del aire producida por las centrales termoeléctricas de carbón chinas y los misteriosos procesos que acontecen en los océanos. Añade Santer que el efecto neto ha sido el de compensar parte del calentamiento que el ser humano provoca con la emisión de gases de efecto invernadero.

Mientras, el calentamiento global sigue ganando intensidad, encubierto por volcanes que en cualquier momento pueden clausurar sus cimas. Según se deduce de erupciones gigantescas pasadas, como la del Monte Pinatubo de Filipinas, en 1991, los aerosoles reflectores retornarán a tierra en unos pocos años como mucho, y el planeta quedará completamente expuesto a los procesos acumuladores de calor de los gases de efecto invernadero generados por la actividad humana.

Si los volcanes no hacen su trabajo, quizás haya que echar mano de un último recurso: nuestros propios aerosoles. Algunos partidarios de la geoingeniería quieren entrar en escena mediante la inyección en la estratosfera de aerosoles sulfatados, con el objeto de aumentar o sustituir el efecto de las erupciones. Estos pequeños y deliberados ajustes a escala planetaria se han concebido como un plan de emergencia en caso de que el cambio climático llegara a ser catastrófico, aunque al precio de sacrificar la capa de la estratosfera que ayuda a proteger la vida de la radiación ultravioleta. El ácido sulfúrico presente en el cielo a gran altitud tiene el inconveniente de eliminar el ozono. Aunque, teniendo en cuenta la inercia en la reducción de la contaminación de efecto invernadero, el debate sobre la geoingeniería persistirá sin duda durante más tiempo que los efectos de esas pequeñas erupciones volcánicas. —*David Biello*

ARQUEOLOGÍA

Las huellas de nuestros ancestros

Un grupo de arqueólogos que trabajan en la costa oriental de Inglaterra han encontrado huellas de antepasados humanos que vivieron entre 780.000 y un millón de años atrás. Impresas en las marismas de un estuario y endurecidas por el paso del tiempo, representan las más antiguas conocidas más allá de África, cuna de la humanidad.

Se descubrieron a principios de mayo de 2013 en un yacimiento costero en Happisburgh. La erosión de la arena de la playa causada por el oleaje había dejado al descubierto las marismas que hasta ese momento se encontraban ocultas. El equipo tuvo que actuar deprisa y registrar las huellas antes de que también desaparecieran por la erosión. Se valieron de la fotogrametría de imagen múltiple y del escaneado láser para establecer la forma tridimensional de las marcas.

En un artículo publicado el pasado mes de febrero en *PLOS ONE*, Nick Ashton, del Museo Británico, y sus colaboradores comunicaban que el análisis de las huellas —que muestran impresiones del empeine, tercio anterior, talón y dedos de los pies de varios individuos— indica que pertenecían a un grupo de cinco individuos que caminaban hacia el sur junto a un gran río. Según el tamaño aparente de los pies, debían medir entre 0,93 y 1,73 metros, prueba de que en el grupo había adultos y niños. Calculan que la masa corporal de los adultos estaba entre los 48 y los 53 kilos.



No se sabe con exactitud qué especie primitiva dejó esas huellas, ya que no han aparecido restos humanos en el yacimiento. Pero, a juzgar por la edad de las huellas, un candidato probable es *Homo antecessor*, especie conocida por el yacimiento de Atapuerca y cuyas dimensiones se aproximarían a las deducidas a partir de las huellas de mayor tamaño encontradas en Happisburgh.

Happisburgh es el yacimiento más antiguo conocido en el norte de Europa con vestigios humanos. Excavaciones anteriores han descubierto allí docenas de herramientas de pedernal, que aquellas antiguas gentes podrían haber usado paras descuartizar animales o procesar sus pieles. ¿De dónde venían los individuos que dejaron las huellas y adónde iban? Quizá la continua erosión de la costa revele más indicios sobre cómo era su vida. —*Kate Wong*

GETTY IMAGES (*volcán*); DE: «HOMININ FOOTPRINTS FROM EARLY PLEISTOCENE DEPOSITS AT HAPPISBURGH, U.K.». NICK ASHTON ET AL. EN *PLOS ONE*, VOL. 9, N.º 2, ARTÍCULO N.º E88329; FEBRERO DE 2014 (*huellas*)

El legado póstumo del Kepler

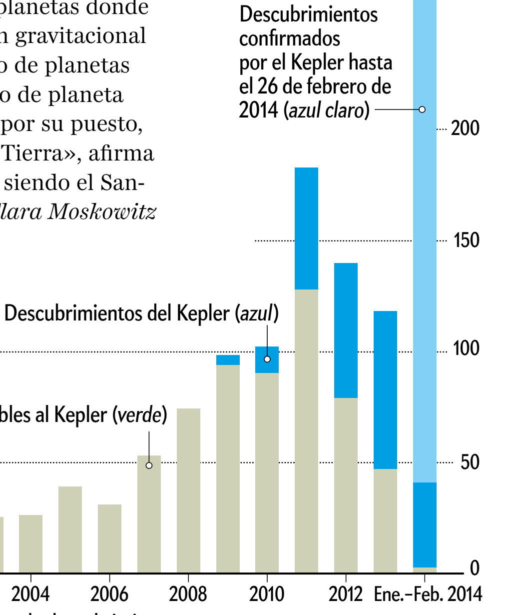
El telescopio espacial Kepler, de la NASA, fue enviado al espacio en 2009 y el año pasado dejó de recoger datos tras sufrir una avería. Sin embargo, en su corta vida ha cosechado multitud de hallazgos. En febrero, la comunidad científica anunció una nueva remesa de datos que ha elevado a casi 1.700 el número de planetas descubiertos hasta el momento. Es la mayor aportación hasta la fecha, afirma Jason Rowe, del Centro de Investigaciones Ames de la NASA y codirector de la investigación. Se estudiaron más de 1200 sistemas y se han llegado a confirmar 715 planetas. Todos estos nuevos mundos pertenecen a sistemas multiplanetarios (estrellas con más de un satélite orbitando a su alrededor).

Para descartar las señales que pueden provocar falsos positivos, los investigadores han utilizado una nueva estrategia. Kepler buscaba los planetas midiendo la disminución que sufre el brillo de la estrella cuando un planeta pasa por delante. Esta técnica, denominada método del tránsito, es muy precisa, pero a veces sufre el «engaño» de objetos que no son planetas. Uno de los falsos positivos más frecuentes es el que provoca una binaria eclipsante: un par de estrellas, en órbita cada una alrededor de la otra, que, desde nuestra perspectiva, se cruzan.

Puede ser complicado distinguir entre las estrellas con un solo planeta y las binarias eclipsantes, pero es mucho más difícil equivocarse con los sistemas multiplanetarios. «Puede pasar, pero es poco probable que haya dos binarias eclipsantes en la línea de observación de una estrella», indica Francois Fressin, del Centro Smithsoniano de Astrofísica de Harvard, que no participaba en el estudio. También es posible, aunque muy improbable, encontrar una binaria eclipsante y una estrella con un planeta, en la misma línea de observación de una estrella.

Rowe y sus colaboradores intentaron descartar las señales falsas estudiando la luz proveniente de los objetos candidatos a planeta. Buscaron una característica distintiva particular conocida como «centroide móvil»: un punto de luz descentrado que solo una binaria eclipsante puede crear, nunca un planeta.

Han sido admitidos en ese tesoro de abundantes descubrimientos: un planeta que podría ser rocoso; una peculiar estrella binaria cuyas estrellas tienen sus propios planetas, y algunos sistemas abarrotados de planetas donde cada uno de ellos provoca un tirón gravitacional sobre los otros. «Nuestro conjunto de planetas confirmados incluye cualquier tipo de planeta que uno pueda imaginar, excepto por su puesto, el equivalente al perfecto planeta Tierra», afirma Rowe. Por el momento, este sigue siendo el Santo Grial del Kepler. —*Clara Moskowitz*



FUENTE: NASA/SETI/JASON ROWE (*gráfica*); MUSEO DE LA EVOLUCIÓN HUMANA (*figura de cera*)

CONFERENCIAS

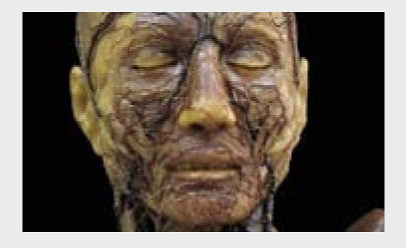
6 de mayo
La astrometría y el papel del Observatorio Fabra: pasado, presente y futuro
William F. van Altena, Universidad Yale
Acto inaugural del 250º aniversario de la RACAB
Salón de Ciento
Ayuntamiento de Barcelona
www.racab.es/es/250aniversari

20 de mayo
Cómo afrontaban nuestros antepasados los chubascos y las sequías
Mariano Barriendos, Universidad de Barcelona
Ciclo «La ciencia del agua»
Roca Barcelona Gallery
www.ub.edu/laubdivulga/lacienciadelaigua

EXPOSICIONES

Big bang data
Centro de Cultura Contemporánea de Barcelona
www.cccb.org/es/exposicio-big_bang_data-45167

Cuerpos en cera
Museo de la Evolución Humana
Burgos
www.museoevolucionhumana.com



OTROS

10 de mayo – Concurso (final)
Cristalización en la escuela
Sede del CSIC
Madrid
www.lec.csic.es/concurso

15 de mayo - Debate
Neurociencia y educación
Ismael Palacín, Fundación Jaume Bofill
David Bueno, Universidad de Barcelona
Ignacio Morgado, Universidad Autónoma de Barcelona
Instituto de Estudios Catalanes
Barcelona
pasteur.crg.es > Eventos

22 y 23 de mayo – Congreso coloquio
50 aniversario de los Estudios de Matemáticas
Universidad de Granada
www.ugr.es/~mat_50

COSMOLOGÍA

Primera señal de ondas gravitacionales primigenias

Nuevos datos sobre los primeros instantes del universo apoyan la hipótesis de la inflación cósmica

RON COWEN

Los astrónomos han rastreado el cielo hasta remontarse al principio de los tiempos y han encontrado lo que parece ser el tan buscado rastro de la teoría inflacionaria. Según esta, el cosmos habría experimentado una fase de rápido crecimiento exponencial durante la primera fracción de segundo de su existencia.

Gracias a un radiotelescopio situado en el Polo Sur, una colaboración internacional ha hallado los primeros indicios de ondas gravitacionales primigenias: perturbaciones en el espaciotiempo generadas durante el período inflacionario, hace 13.800 millones de años.

El experimento BICEP2 ha detectado la huella que esas ondulaciones primordiales imprimieron en el cielo unos 380.000 años más tarde, cuando aún no había estrellas y la materia no era más que una sopa de partículas. Dicha señal ha sido observada en el fondo cósmico de microondas, la radiación que en aquel momento emitió el plasma blanco y caliente. Durante los miles de millones de años que han transcurrido desde entonces, la expansión cósmica ha ido enfriando dicha radiación hasta convertirla en luz de microondas.

Según los expertos, el hecho de que la inflación, un fenómeno cuántico, haya generado ondas gravitacionales demuestra que también la gravedad reviste una naturaleza cuántica, al igual que el resto de las interacciones fundamentales. El resultado abre además una puerta a sondear procesos físicos mucho más energéticos que los que podrían observarse en ningún laboratorio. Por último, el método por el que se ha confirmado la teoría de la inflación cósmica resulta notable en sí: constituye el indicio más directo obtenido hasta ahora de la existencia de ondas gravitacionales, una predicción clave pero muy escurridiza de la teoría de la relatividad general de Einstein.

«Se trata de una prueba completamente nueva e independiente que encaja a la perfección en el contexto inflacionario», señala Alan Guth, físico teórico del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) que, en 1980, propuso la idea de la inflación cósmica. Guth añade que el resultado merece «sin duda» un premio Nobel.

Inflación instantánea

Según su idea, el cosmos se habría expandido a una velocidad exponencial durante



EL TELESCOPIO BICEP2, en el polo Sur, ha detectado la primera señal de las ondas gravitacionales generadas durante los primeros instantes del universo.

BICEP2

unas decenas de billonésimas de billonésimas de billonésimas de segundo después de la gran explosión. En el proceso, las proporciones del universo observable se habrían hinchado desde escalas subatómicas hasta alcanzar las de un balón de fútbol. La inflación resuelve algunos de los problemas clásicos de la cosmología, como la cuestión de por qué el universo actual es tan uniforme. Pero, a pesar de que la teoría inflacionaria resultaba compatible con todos los datos empíricos obtenidos hasta la fecha, hasta ahora no contaba con un apoyo experimental tan sólido.

Los cosmólogos sabían que la inflación tenía que haber dejado un vestigio muy particular. Aquel breve pero intenso período de expansión exponencial habría generado ondas gravitacionales, perturbaciones que comprimen el espacio en una dirección y lo dilatan en otra. Aunque esas ondas continuarían propagándose aún hoy por el universo, en la actualidad serían demasiado débiles para detectarlas por medios directos. Sin embargo, en su día habrían dejado una huella en el fondo cósmico de microondas; en concreto, un patrón rotacional en la polarización de la luz conocido como *modo B*.

El año pasado, el Telescopio del Polo Sur (SPT, también en la Antártida) fue el primero en detectar el modo B en la polarización del fondo de microondas. Sin embargo, aquella señal se detectó en escalas angulares inferiores a un grado (el doble del tamaño aparente de la Luna), por lo que se atribuyó al efecto gravitatorio de las galaxias, las cuales curvan el espacio que debe atravesar la luz en su camino hasta la Tierra. La teoría inflacionaria predice que la señal generada por las ondas gravitacionales primigenias debería ser máxima a escalas de entre 1 y 5 grados. Eso es justo lo que John Kovac, del Instituto Smithsoniano de Astrofísica de Harvard (CfA), y el equipo de BICEP2 afirman haber detectado.

Para aislar el minúsculo efecto de los modos B, los investigadores han tenido que medir la intensidad del fondo de microondas con una precisión de una parte en 10 millones, así como desbrozar los datos para distinguir ese efecto de los producidos por otras fuentes, como el polvo galáctico.

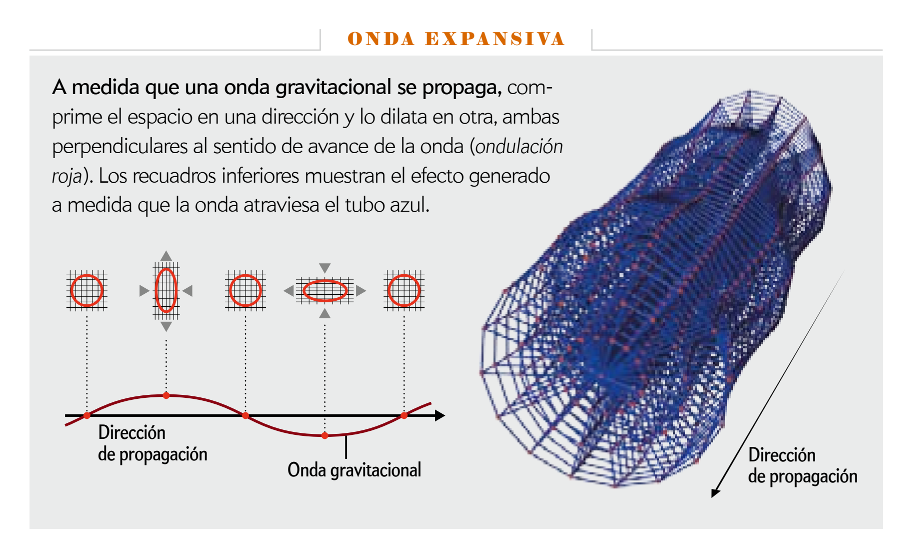
«La gran pregunta», explica el astrofísico del CfA Daniel Eisenstein, «es si puede existir alguna fuente que imite esta señal». Según él, los investigadores han descartado esa posibilidad. Primero, porque pusieron gran cuidado en orientar BICEP2 (formado por 512 detectores de microondas) hacia el «hoyo sur», una región del cielo conocida por la baja cantidad de interferencias que presenta. Además, compararon sus datos con los de la primera versión del experimento (BICEP1), gracias a lo cual pudieron demostrar que una señal producida por el polvo galáctico produciría una señal con otra frecuencia. Por último, los datos tomados con Keck, un detector más sensible que el equipo terminó de instalar en el Polo Sur en 2012 y continuará operando dos años más, muestran las mismas características. «Ver la misma señal en dos telescopios distintos resulta muy convincente», asegura Kovac.

«Aún habrán de perfilarse los detalles, pero, por lo que sé, esto es justo lo que todos estábamos esperando», apunta John Carlstrom, astrónomo de la Universidad de Chicago e investigador principal del experimento SPT. «El descubrimiento de las ondas gravitacionales generadas durante la inflación.»

Señal sólida

El cosmólogo Marc Kamionkowski, de la Universidad John Hopkins, asegura que el

ONDA EXPANSIVA



A medida que una onda gravitacional se propaga, comprime el espacio en una dirección y lo dilata en otra, ambas perpendiculares al sentido de avance de la onda (*ondulación roja*). Los recuadros inferiores muestran el efecto generado a medida que la onda atraviesa el tubo azul.

TIRABUZONES CÓSMICOS

Al estudiar la polarización del fondo cósmico de microondas, el experimento BICEP2 ha observado un patrón rotacional, débil pero muy característico, conocido como *modo B*. La señal constituye la primera prueba de la existencia de ondas gravitacionales provenientes del período inflacionario: la expansión de proporciones descomunales que experimentó el universo durante su primera fracción de segundo.

Magnitud de giro
Sentido horario
Sentido antihorario
Intensidad y orientación de la polarización en diferentes puntos del cielo

Coordenadas astronómicas (declinación, en grados): −50, −55, −60, −65
Coordenadas astronómicas (ascensión recta, en grados): 30, 20, 10, 0, −10, −20, −30

FUENTE: MARCUS PÖSSEL/EINSTEIN-ONLINE.INFO (*onda gravitacional*); BICEP2 COLLABORATION (*mapa de polarización*)

resultado reviste solidez. Kamionkowski fue uno de los primeros en calcular la señal que las ondas gravitacionales primigenias tendrían que haber dejado en el fondo de microondas. «[Su hallazgo] está a la misma altura que el descubrimiento de la energía oscura o el de la radiación cósmica de fondo, algo que solo sucede una vez en décadas», señala el investigador.

Aunque compatible con la hipótesis inflacionaria, la intensidad de la señal medida por BICEP2 sorprendió en un principio a los físicos, ya que se mostraba unas dos veces mayor que la estimada por otros experimentos previos. La intensidad de los modos B revela cuán rápido se expandió el cosmos durante el período inflacionario, por lo que sugiere la escala de energías típica de aquella época. Los datos indican el momento en que tuvo lugar la inflación (unos 10^{-37} segundos después de la gran explosión) y la temperatura del universo en aquel entonces. Ello corresponde a una energía del orden de 10^{16} gigaelectronvoltios, explica Michael Turner, cosmólogo de la Universidad de Chicago. Se trata de la misma escala de energías a la que, según los modelos de gran unificación, las intensidades de tres de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza (la interacción nuclear fuerte, la débil y el electromagnetismo) convergerían hacia un mismo valor.

Dado que la inflación tuvo lugar en un contexto cuántico, haber detectado las ondas gravitacionales generadas en aquella época constituye la primera prueba experimental de que también la gravedad es un fenómeno cuántico, apunta Max Tegmark, cosmólogo del MIT. Con todo, los físicos aún deberán encontrar una formulación teórica que conjugue la teoría cuántica y la relatividad general de Einstein.

Los investigadores presentaron sus resultados el pasado 17 de marzo en el CfA, durante una rueda de prensa celebrada justo después de una charla técnica. Los investigadores también hicieron públicos varios artículos con los resultados. Con ello parecen haberle ganado la mano al SPT y al resto de sus competidores en la carrera por encontrar la impronta inflacionaria en el fondo de microondas; entre ellos, el telescopio espacial Planck, de la Agencia Espacial Europea.

La obtención de datos más completos sobre los modos B debería aportar más información sobre cómo se desarrolló la inflación y qué la produjo. En particular, se espera que este mismo año el telescopio espacial Planck finalice el mapa del cielo completo.

Además de mirar hacia atrás en el tiempo como ningún otro experimento lo había hecho hasta ahora, los resultados de BICEP2 «abren la puerta a explorar una escala de energías un billón de veces mayor que la que puede sondear el LHC, el acelerador de partículas más potente del mundo», apunta Avi Loeb, cosmólogo del CfA y miembro de la colaboración BICEP2.

—Ron Cowen
Periodista científico especializado en física y astronomía

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 507, págs. 281-283, 20 de marzo de 2014. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2014

PARA SABER MÁS

BICEP2 I: Detection of B-mode polarization at degree angular scales. Colaboración BICEP2, 17 de marzo de 2014. Disponible en **arxiv.org/abs/1403.3985**

BICEP2 II: Experiment and three-year data set. Colaboración BICEP2, 17 de marzo de 2014. Disponible en **arxiv.org/abs/1403.4302**

FÍSICA

Nuevos mecanismos de control en la propagación de plasmones superficiales

Un sencillo fenómeno que había pasado inadvertido augura nuevas aplicaciones en plasmónica y óptica

FRANCISCO JOSÉ RODRÍGUEZ FORTUÑO

Los plasmones superficiales son ondas electromagnéticas que se propagan sobre la superficie de un metal, formadas a partir del acoplamiento entre la luz y los electrones libres del material. Desde un punto de vista práctico, la plasmónica aúna las ventajas de dos campos tecnológicos: el gran ancho de banda de la óptica, por un lado, y la capacidad de integración y miniaturización de la electrónica, por otro. Por ello, somos muchos los científicos que pensamos que, en el futuro, los circuitos plasmónicos se erigirán como componentes fundamentales en ordenadores y otros dispositivos de procesamiento de la información.

En tales aplicaciones, la capacidad para controlar la dirección de propagación de los plasmones superficiales revestirá una importancia fundamental. Uno de los métodos para generar plasmones sobre la superficie de un metal consiste en acercar a esta un emisor óptico. Este suele modelizarse como un dipolo; es decir, como una oscilación de cargas opuestas. Hasta ahora, se pensaba que dichas oscilaciones generaban ondas de superficie en todas las direcciones del metal. Inducir una dirección de propagación única solo se había logrado con complicadas estructuras asimétricas, resonantes, de bajo ancho de banda y sin la posibilidad de conmutar con rapidez la dirección de propagación.

En un artículo publicado en abril del año pasado en la revista *Science* junto con Alejandro Martínez, de la Universidad Politécnica de Valencia, y en colaboración con el grupo de Anatoly Zayats, del King's College de Londres, propusimos y demostramos una forma de conseguirlo, muy sencilla y caracterizada por un gran ancho de banda. La técnica se basa en el hecho de que, cuando la oscilación de las cargas del emisor sigue una trayectoria circular, como ocurre al usar un dipolo polarizado circularmente, la excitación de los plasmones tiene lugar en una sola dirección, la cual queda determinada por el sentido de rotación de las cargas (a modo de analogía, podemos imaginar un molino que gira sobre un canal de agua).

Sorprendentemente, este fenómeno de propagación unidireccional resulta tan

básico que no solo funciona para la plasmónica, sino para cualquier otro sistema de luz guiada, como una guía dieléctrica o una fibra óptica. Por ello, sus posibles aplicaciones se antojan innumerables. No deja de resultar curioso que un mecanismo tan sencillo haya pasado desapercibido durante tanto tiempo, pues los fundamentos físicos que lo caracterizan se conocen desde hace décadas.

MOLINO PLASMÓNICO: Simulación esquemática de los plasmones inducidos en una superficie metálica (*dorado*) por un dipolo oscilante polarizado circularmente (*burbuja central*). La altura de las ondulaciones representa la acumulación de carga sobre la superficie, lo que muestra el carácter eminentemente unidireccional de la propagación. Este nuevo mecanismo de control de plasmones superficiales promete futuras aplicaciones en dispositivos optoelectrónicos de gran ancho de banda.

A fin de demostrar el fenómeno, empleamos luz circularmente polarizada para iluminar una ranura tallada sobre una superficie metálica. Dicha iluminación genera sobre la ranura un movimiento circular de cargas, el cual excita los plasmones de la superficie del metal en una dirección bien definida. A su vez, esta puede escogerse sin más que modificar el sentido de rotación de la polarización circular.

Debido a su gran ancho de banda, el mecanismo podría emplearse en futuros nanoenrutadores plasmónicos de alta velocidad. Nuestro trabajo también ha demostrado su funcionamiento en guías dieléctricas. Dada su universalidad, esperamos que muy pronto comiencen a aparecer numerosas e inesperadas aplicaciones de este nuevo fenómeno.

—Francisco José Rodríguez Fortuño
Centro de Tecnología Nanofotónica
Universidad Politécnica de Valencia

PARA SABER MÁS

Near-field interference for the unidirectional excitation of electromagnetic guided modes. Francisco J. Rodríguez-Fortuño et al. en *Science*, vol. 340, n.º 6130, págs. 328-330, 19 de abril de 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

Plasmones superficiales. F. J. García Vidal y L. Martín Moreno en *IyC*, octubre de 2008.

PERFIL

Ramon Margalef, el ecólogo total

Además de sus valiosas aportaciones científicas a la ecología, destacó por su labor docente y su esfuerzo en divulgar esta ciencia

JOANDOMÈNEC ROS

Este mes se cumple el décimo aniversario del fallecimiento de Ramon Margalef López, a los 84 años de edad, después de una vida plena dedicada a la investigación de los ecosistemas acuáticos, a la docencia universitaria y a la divulgación de la ciencia ecológica. Dotado desde muy joven de una enorme curiosidad por la naturaleza, las ciencias en general y los idiomas, su formación fue en gran parte autodidacta. Algunos profesores y mecenas descubrieron sus cualidades y le animaron a estudiar el bachillerato (había cursado solo estudios comerciales) y una carrera universitaria en ciencias naturales. Ambos los completó en menos años de los requeridos.

Interesado por la vida en las aguas continentales, inició investigaciones fundamentales en limnología, primero como becario del Instituto Botánico y después como colaborador del Instituto de Biología Aplicada, ambos en Barcelona. Se incorporó posteriormente al Instituto de Investigaciones Pesqueras (IIP, del CSIC), donde inició nuevas líneas de investigación en oceanografía biológica, centradas principalmente en la caracterización y dinámica del fitoplancton marino. Llegó a ser director del IIP, cargo que tuvo que abandonar por incompatibilidad con el de catedrático de universidad: fue el primer catedrático de ecología de España (1967), en la Universidad de Barcelona.

Margalef hizo contribuciones muy notables a la ecología acuática y a la ecología general, al postular varios conceptos ecológicos unificadores sobre las propiedades estructurales y funcionales de los



CORTESÍA DE R. MARGALEF MIR, MARC ROBITAILLE (*fotógrafo*)

ecosistemas. Estos conceptos, a menudo controvertidos cuando se formularon, han logrado por fin una aceptación general. Algunos de los hitos más importantes de tales contribuciones fueron la aplicación de la termodinámica al estudio de los ecosistemas; el uso de la teoría de la información para cuantificar la organización que representa la diversidad taxonómica de un ecosistema, y el empleo de la diversidad y de la conectividad de las especies como medidas de la organización y la complejidad de los ecosistemas.

Asimismo, se interesó por el desarrollo temporal de los ecosistemas, o sucesión ecológica, y describió los cambios que experimentan a lo largo de ella algunas variables ecológicas (como la producción, la biomasa y la relación entre ambas, la diversidad y la organización estructural); consideró la sucesión ecológica como marco evolutivo del desarrollo de los ecosistemas; analizó la distribución a pequeña escala del fitoplancton marino y de aguas continentales, y cuantificó la diversidad del plancton. También estudió la respuesta de los ecosistemas a diversos tipos de estrés, en especial a la escasez de nutrientes (principalmente el fósforo); el papel de la energía auxiliar y de la disponibilidad de nutrientes en la selección de las formas biológicas del fitoplancton y, de manera más general, la producción de materia orgánica tanto en el mar como en toda la biosfera.

El estudio del fitoplancton marino y de los sistemas oceánicos de afloramiento permitió a Margalef abrir el camino de la unificación de la oceanografía física y biológica, algo que hoy damos por hecho y que le valió el reconocimiento internacional. Pero su aportación no se limitó al estudio del plancton: la búsqueda de generalidades en el funcionamiento de la naturaleza le permitió establecer pautas generales aplicables a todo tipo de ecosistemas y a la biosfera en general. Cabe destacar en este sentido la inclusión de la especie humana en su teoría general de la biosfera, como otra especie más, y la aplicación a la misma de aquellas pautas y generalidades.

Margalef fue autor de más de cuatrocientos artículos científicos, de un buen número de artículos de divulgación y de libros fundamentales para el conocimiento de la ciencia ecológica. El librito *Perspectives in ecological theory* (1968, traducido a varios idiomas, entre ellos el español) y sus artículos «On certain unifying principles in ecology» (1963), «Life-forms of phytoplankton as survival alternatives in an unstable environment» (1978) y «From hydrodynamic processes to structure (information) and from information to process» (1985), se han convertido en clásicos

y han sido citados por númerosos investigadores. En concreto, el primer artículo figura entre los diez mejores de la biología del siglo xx.

Dos de sus libros fueron manuales universitarios. A cuatro y tres décadas de distancia, respectivamente, siguen siendo fundamentales en su campo: *Ecología* (1974) y *Limnología* (1983). El primero se consideró, durante muchos años, el mejor libro en su área de los escritos en cualquier idioma; Margalef lo puso al día en obras posteriores: *La biosfera, entre la termodinámica y el juego* (1980), *Teoría de los sistemas ecológicos* (1991), *Oblik biosfer* (1992) y, el último de ellos, *Our biosphere* (1997, traducido al catalán en 2012). Son también notables otras publicaciones que él coordinó, como *Ecología marina* (1967) y *El Mediterráneo occidental* (1989), así como magníficas obras de divulgación de la ciencia ecológica, entre ellas *Ecología* (1981), *L'ecologia* (1985) y *Planeta azul, planeta verde* (1992). Contribuyó asimismo a diversas enciclopedias, principalmente *Història Natural dels Països Catalans* (1984-1992) y *Biosfera* (1993-1998). También escribió varios artículos de divulgación en Investigación y Ciencia, uno de ellos en el primer número de la revista, en 1976.

Margalef combinaba de manera incansable el trabajo de campo y de laboratorio con la indagación teórica más creativa y avanzada; fue seguramente el investigador más completo y más conocido internacionalmente de todos cuantos ha dado España, a la par con Santiago Ramón y Cajal y Severo Ochoa, y el mundo científico le reconoció ampliamente con numerosos premios y distinciones. Su maestrazgo se ha dejado sentir en todo el mundo, pero en especial entre los ecólogos españoles e hispanoamericanos. La Generalidad de Cataluña instituyó hace una década el Premio Ramon Margalef de Ecología, que ha distinguido anualmente a los mejores ecólogos mundiales.

—Joandomènec Ros
Catedrático de ecología de la Universidad de Barcelona
Presidente del Instituto de Estudios Catalanes

EN NUESTRO ARCHIVO

Biología de los embalses. R. Margalef en *IyC*, octubre de 1976.
Las áreas oceánicas más productivas. R. Margalef y M. Estrada en *IyC*, octubre de 1980.
La ecología, entre la vida real y la física teórica. R. Margalef en *IyC*, junio de 1995.

BOTÁNICA

Ascenso en altitud de la vegetación de montaña

Un estudio a escala europea revela que la flora alpina va ocupando gradualmente cotas más altas por efecto del calentamiento global

JOSÉ LUIS BENITO ALONSO

Distintas aproximaciones sobre los cambios que experimentará la biodiversidad en el presente siglo predicen una reducción del hábitat alpino y, en última instancia, una desaparición a escala regional de numerosas plantas europeas de alta montaña. Se supone que el proceso está impulsado por el ascenso general de las especies vegetales bajo el efecto del calentamiento del clima. Sin embargo, hasta hace poco había escasos datos empíricos que confirmaran esta tendencia.

En este contexto, el proyecto GLORIA (por las siglas, en inglés, de Iniciativa para la Investigación y el Seguimiento Global de los Ambientes Alpinos), coordinado por un equipo de la Universidad de Viena y en el que participa nuestro grupo, entre otros, ha establecido una red mundial para conocer si el calentamiento global está, de hecho, afectando a la flora de alta montaña y, en caso afirmativo, en qué medida lo hace.

La originalidad del proyecto reside en que es la primera vez que se realiza un seguimiento coherente (con la misma metodología y de forma simultánea) de los efectos del calentamiento global sobre un ecosistema concreto, en este caso las comunidades de flora vascular alpina. Además, el estudio analiza con precisión el período vegetativo de la flora de alta



EN CADA UNA de las cimas estudiadas se han establecido parcelas cuadradas, en distintas orientaciones, y en ellas se ha realizado un seguimiento de la flora a lo largo del tiempo. En la imagen, parcela situada en el monte Tobacor, en el Pirineo aragonés.

CORTESÍA DE JOSÉ LUIS BENITO ALONSO



ANDROSACE CILIATA **es una de las plantas de la alta montaña pirenaica que puede verse afectada por el calentamiento global.**

montaña y cómo varía este en función de la exposición de la vertiente (norte, sur, este u oeste), la altitud y la latitud.

Una de las ventajas de centrarse en los ecosistemas alpinos es que las posibles variaciones que se registren en estos ambientes no serán atribuibles a otros factores, pues se estudian montañas poco intervenidas por el hombre. Además, la flora alpina está representada en todos los continentes y se puede investigar en todas las cordilleras del planeta.

La primera fase del proyecto, que abarcó el período entre 2001 y 2008, se llevó a cabo en 17 macizos de Europa; en la actualidad, el número de zonas piloto, repartidas por todo el mundo, se ha ampliado a 115. Nuestro país participa desde sus inicios con dos zonas: una en el Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido (bajo la coordinación científica de Luis Villar, del Instituto Pirenaico de Ecología-CSIC en Jaca, y el apoyo del Gobierno de Aragón) y otra en la Sierra Nevada (gestionada por la Universidad de Granada). Posteriormente, se han unido otras cuatro zonas al proyecto: una segunda localización, en la Sierra Nevada y en el Pirineo Central, respectivamente; una en el Sistema Central (a cargo de la Universidad Complutense de Madrid), y otra en el Moncayo, en el Sistema Ibérico (gestionada también por el Gobierno de Aragón).

Diferencias entre norte y sur

Los primeros resultados del proyecto, que abarcan el período entre 2001 y 2008, se publicaron en la revista *Science* en abril de 2012. Gracias a la red de termómetros automáticos instalados en las cimas de estudio, se ha verificado que en ese intervalo la temperatura media diaria de las mínimas de junio ascendió 1,6 ºC en el Pirineo y Sierra Nevada, resultando esta alza más acusada que la del conjunto de las montañas analizadas en Europa, que se sitúa de media en los 0,7 ºC. (Las medidas se tomaron a partir del mes junio porque en este tiempo la nieve suele derretirse y el suelo se deshiela. Corresponde, por tanto, al inicio del período vegetativo para las plantas de alta montaña.)

Los termómetros han permitido determinar por primera vez la duración del período vegetativo en la alta montaña del Pirineo central. Teniendo en cuenta que existe una gran variabilidad interanual, se ha observado que el período se extiende, en promedio, 209 días (unos siete meses) a 2200 metros de altitud y 76 días (dos meses y medio) a 3300 metros. Además, hemos comprobado que, en una misma cima, este período es un mes más corto en la cara norte que en la sur. En esta zona hemos medido también el gradiente térmico del suelo (la temperatura se registró a 10 centímetros de profundidad) y hemos observado una disminución media de 0,6 ºC cada 100 metros de altitud. Además, el suelo permanece helado 11,6 días más por cada 100 metros de ascenso.

Los datos conjuntos del proyecto GLORIA confirman que la flora alpina europea está experimentando un ascenso en altitud. Ello supone que, poco a poco, las plantas amantes del calor (termófilas), propias de cotas inferiores, están desplazando a las especies de alta montaña o plantas alpinas, más adaptadas al frío, lo que nos lleva a hablar de la termofilización de las montañas. En el intervalo de tiempo estudiado se ha producido un ascenso medio en altitud de la flora alpina europea de 2,7 metros, lo que a largo plazo puede provocar la extinción de las especies más frioleras por la pérdida de su hábitat idóneo.

Sin embargo, se han observado diferencias entre el norte y el sur del continente. Mientras que en las cimas de las montañas del centro y norte de Europa, en el área boreo-templada, se ha producido un aumento en el número de especies contabilizadas, en las montañas de la región mediterránea se ha registrado una disminución de la diversidad vegetal. Ello puede ser debido a que un aumento de la temperatura en la zona meridional, donde los veranos ya son secos de por sí y la evapotranspiración es mayor que la precipitación, causa mayor estrés hídrico justo en el período más crítico para el desarrollo de las plantas, mientras que en las montañas del norte, donde no hay sequía veraniega, este fenómeno no ocurre.

Debido a que las montañas mediterráneas son especialmente ricas en especies endémicas, una continuación de esta tendencia podría reducir la flora de montaña en Europa, a pesar del incremento medio de la riqueza de especies en las cumbres de toda la región.

José Luis Benito Alonso
Jolube Consultor Botánico y Editor
Jaca (Huesca)

PARA SABER MÁS

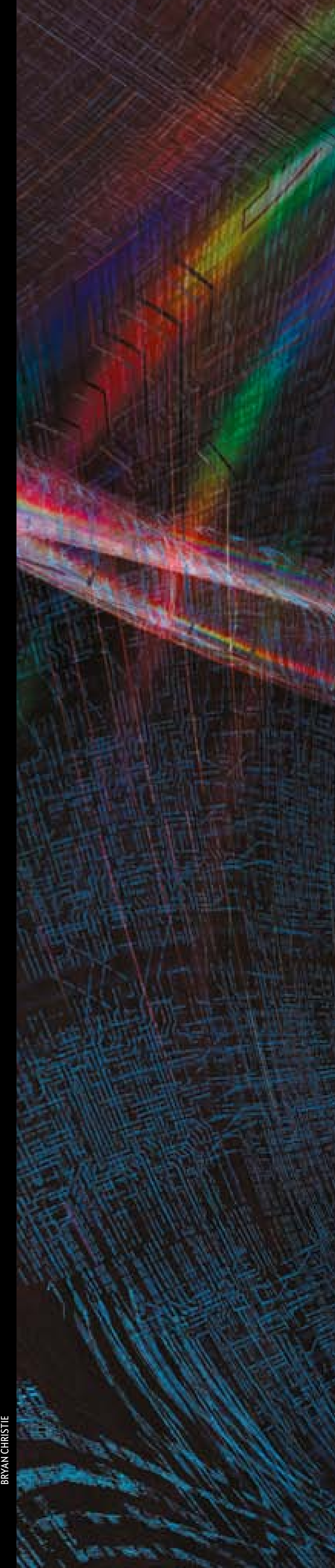
Recent plant diversity changes on Europe's mountain summits. H. Pauli et al. en *Science*, vol. 336, n.º 6079, págs. 353-355, abril de 2012.

NEUROCIENCIA

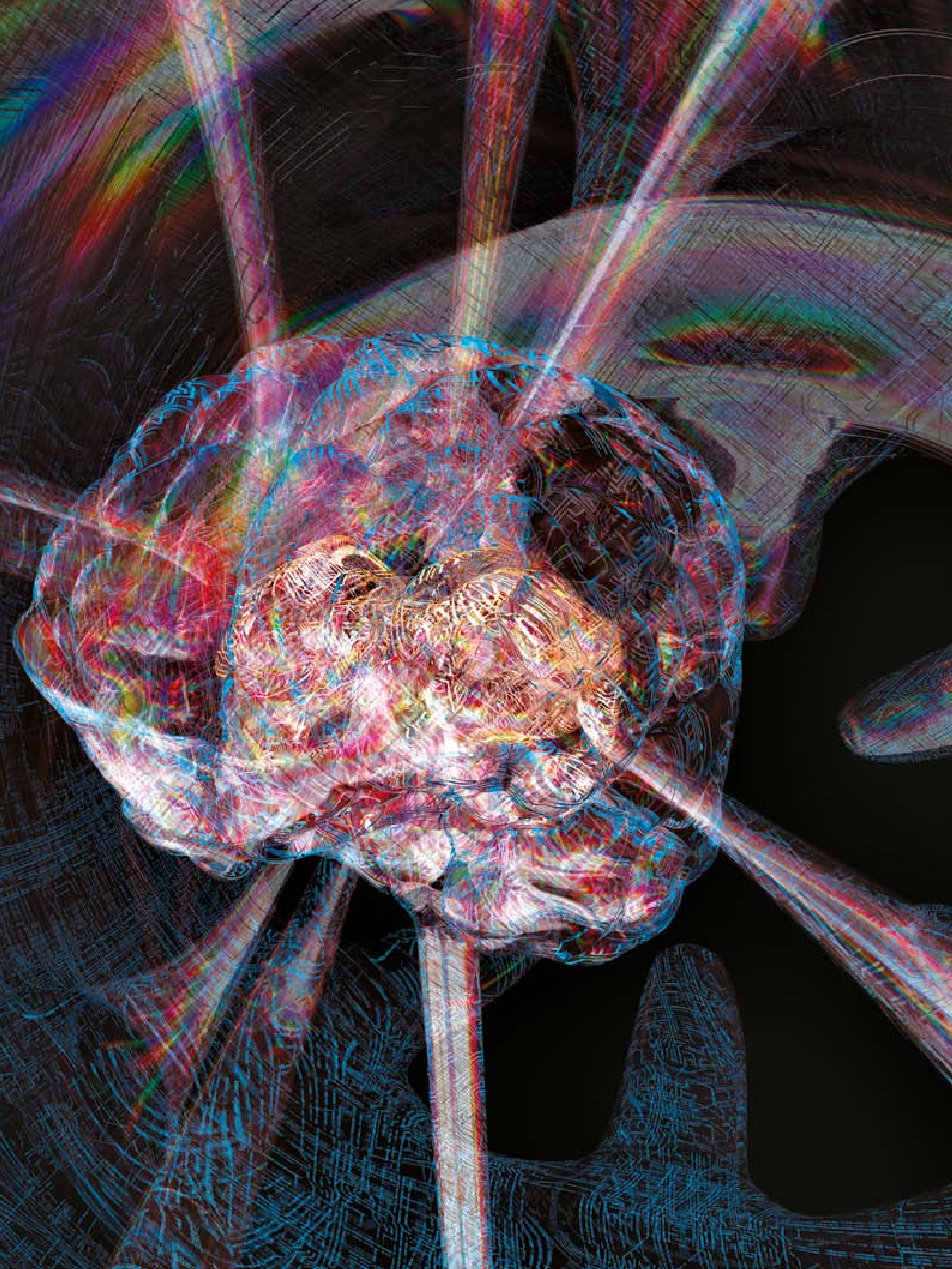
EL NUEVO SIGLO DEL CEREBRO

Las nuevas técnicas de observación y control neural allanan el camino para conocer el modo en que la máquina más compleja del mundo genera nuestros pensamientos y emociones

Rafael Yuste y George M. Church



BRYAN CHRISTIE



Rafael Yuste es profesor de ciencias biológicas y neurociencia en la Universidad de Columbia y codirector del Instituto de Neurociencia de la Fundación Kavli. Hace poco ha recibido el Premio al Investigador Pionero del Director de los Institutos Nacionales de la Salud de EE.UU.



George M. Church es profesor de genética en la Universidad Harvard y fundador de PersonalGenomes.org, una base de datos de libre acceso de genomas humanos, neuroimágenes y rasgos cognitivos y conductuales.

A PESAR DE LLEVAR UN SIGLO DE INTENSAS INVESTIGACIONES, LOS NEUROCIENTÍFICOS siguen sin conocer el funcionamiento del cerebro, el órgano de apenas 1,5 kilogramos que constituye la base de nuestra actividad consciente. Muchos han intentado abordar el problema estudiando el sistema nervioso de organismos más sencillos. De hecho, han pasado casi treinta años desde que se cartografiaran las conexiones de cada una de las 302 neuronas del parásito intestinal *Caernohabditis elegans*. Sin embargo, el mapa de los circuitos neurales no ayudó a entender cómo se originaban comportamientos tan básicos como la alimentación o la reproducción. Faltaban datos que permitieran relacionar la actividad de las neuronas con conductas específicas.

Establecer una relación entre la biología y el comportamiento humano reviste aún mayor dificultad. Los medios de comunicación informan a menudo sobre estudios que demuestran la activación de ciertas regiones cerebrales cuando nos sentimos rechazados o hablamos una lengua extranjera. Estas noticias pueden darnos la sensación de que la tecnología actual aporta datos fundamentales sobre el funcionamiento del cerebro, pero tal idea resulta engañosa.

Un ejemplo digno de mención de esta discordancia es un estudio ampliamente divulgado que identificó neuronas individuales que se activaban ante la visión del rostro de la actriz Jennifer Aniston [*véase* «El archivo de la memoria», por R. Quian Quiroga, I. Fried y C. Koch; Investigación y Ciencia, abril de 2013]. Dejando aparte el bombo y el platillo, el descubrimiento constituyó una suerte de señal en medio del desierto, aunque no aportaba indicación alguna sobre el significado de la transmisión. Todavía hoy se ignora el modo en que los pulsos de actividad eléctrica de neuronas aisladas permiten identificar el rostro de Aniston y relacionarlo con la serie de televisión *Friends*. Para que el cerebro reconozca a la actriz, tal vez deban activarse un gran grupo de células, que se comunicarían entre sí mediante un código neural todavía por descifrar.

El hallazgo ejemplifica también la encrucijada a la que ha llegado la neurociencia. Hoy en día tenemos medios para medir la actividad de neuronas individuales en humanos vivos. Pero para lograr avances importantes, el campo necesita nuevas técnicas que permitan monitorizar y también modificar la actividad eléctrica de miles e incluso millones de neuronas. Tales técnicas deben ayudar a descifrar lo que el pionero neuroanatomista Santiago Ramón y Cajal llamó «las junglas impenetrables en las que tantos exploradores se han perdido».

Los métodos avanzados permitirían, en principio, salvar la brecha de conocimiento entre el impulso nervioso y la cognición. En concreto, cómo se produce la percepción, la emoción, la toma de decisiones y, en último término, la consciencia en sí misma. Descifrar los patrones precisos de la actividad del cerebro ayudará a entender los fallos de los circuitos neurales en trastornos psiquiátricos y neurológicos como la esquizofrenia, el autismo, el alzhéimer o el párkinson.

La necesidad de nuevas estrategias para estudiar el cerebro ha comenzado a plantearse también fuera de los laboratorios. El Gobierno de Obama anunció el año pasado la puesta en marcha de la Iniciativa BRAIN (siglas inglesas de Investigación del Cerebro mediante Neurotécnicas Avanzadas e Innovadoras), el megaproyecto científico más visible del segundo mandato del presidente.

Con una financiación inicial de 100 millones de dólares en 2014 y de 200 millones en 2015, tiene como objeto desarrollar métodos para registrar las señales de un gran número de neuronas e incluso de regiones enteras del cerebro. La iniciativa se complementa con otros grandes proyectos neurocientíficos que se llevan a cabo fuera de Estados Unidos. El Proyecto Cerebro

EN SÍNTESIS

El cerebro, y el modo en el que da lugar al pensamiento consciente, sigue representando uno de los grandes misterios de la ciencia.

Para poder entender mejor este órgano hacen falta nuevos instrumentos que analicen el funcionamiento de los circuitos neurales.

Tal análisis podría abordarse mediante técnicas que registren o controlen la actividad de los circuitos cerebrales.

El Gobierno de EE.UU. ha lanzado una iniciativa a gran escala para promover el desarrollo de estas técnicas.

Humano, de diez años de duración y financiado por la Unión Europea con 1000 millones de euros, pretende desarrollar una simulación informática de todo el cerebro. También en China, Japón e Israel existen ambiciosos proyectos. El consenso global que promueve la inversión en neurociencia hace pensar en otras propuestas tecnológicas y científicas de posguerra que han hecho presión para convertirse en prioridades nacionales: la potencia nuclear, el armamento atómico, la exploración del espacio, los ordenadores, las energías alternativas y la secuenciación del genoma. Ha llegado el siglo del cerebro.

PROPIEDADES EMERGENTES

Averiguar el modo en que las neuronas elaboran el concepto de Jennifer Aniston (o cualquier otra noción sobre una experiencia subjetiva o percepciones del entorno) constituye hoy un obstáculo insalvable. Exige ir más allá del registro de una neurona para entender cómo esta interacciona con otras para dar lugar a un conjunto integrado más amplio, lo que los científicos llaman una propiedad emergente. La temperatura o la solidez de cualquier material, o el estado magnético de un metal, por ejemplo, emergen solo de las interacciones de una multitud de moléculas o átomos. De este modo, los átomos de carbono pueden unirse para crear la dureza de un diamante o la suavidad del grafito. Estas propiedades emergentes no dependen de los átomos individuales, sino del conjunto de interacciones entre ellos.

El cerebro probablemente presente también propiedades emergentes que no pueden conocerse a partir de la inspección de neuronas individuales o de una imagen de baja resolución de la actividad de un gran grupo de neuronas. La percepción de una flor o un recuerdo de la infancia solo pueden discernirse mediante la observación de las señales eléctricas transmitidas a lo largo de intrincadas cadenas de cientos o miles de neuronas. Aunque tales retos no resultan nuevos, aún no existen las herramientas para medir la actividad de los circuitos individuales que subyacen a la percepción o a un recuerdo, o que originan los comportamientos complejos y las funciones cognitivas.

Una manera de salir de este atolladero consiste en reconstruir un mapa de las conexiones anatómicas, o sinapsis, entre las neuronas (una labor denominada conectómica). El Proyecto Conectoma Humano, puesto en marcha hace poco en EE.UU., aportará un diagrama estructural del cableado del cerebro. Pero, igual que sucedió con el gusano, el mapa no es más que el comienzo. Por sí mismo, no podrá identificar las señales eléctricas cambiantes asociadas a los procesos cognitivos.

Para realizar ese tipo de análisis, necesitamos métodos novedosos que midan la actividad eléctrica y vayan más lejos que los actuales. Estos últimos solo aportan una foto precisa sobre el funcionamiento de pequeños grupos de neuronas, o bien brindan imágenes que barren áreas cerebrales más amplias pero sin la resolución necesaria para identificar circuitos neurales que se activan o desactivan. En la actualidad se llevan a cabo registros a pequeña escala mediante la inserción de electrodos muy finos en el cerebro de animales de laboratorio. Se examina la excitación de una sola neurona, el impulso eléctrico que se produce en ella al recibir señales químicas de otras células. Cuando una neurona se activa, se invierte el voltaje a lo largo de su membrana externa. Tal cambio abre el paso de los canales de membrana a los iones de sodio u otros cationes. El flujo de entrada produce a su vez un potencial de acción que viaja a través de la prolongación de la célula (el axón), lo que estimula el envío de señales químicas a otras neuronas y permite la propagación del impulso. Examinar una sola neurona puede equipararse a intentar seguir el argumento de una película de alta definición mientras se mira un único píxel, un propósito imposible. Además, se trata de una técnica agresiva que causa daño tisular cuando los electrodos penetran en el cerebro.

En el polo opuesto, los métodos que examinan la actividad conjunta de neuronas en todo el cerebro también presentan inconvenientes. En el conocido electroencefalograma (EEG), inventado por Hans Berger en los años veinte del siglo pasado, los electrodos se colocan sobre el cráneo y miden la actividad eléctrica combinada de más de 100.000 células nerviosas. El EEG registra oscilaciones de amplitud creciente y decreciente durante milisegundos, aunque no puede distinguir si una neurona en concreto se halla activa o no. La resonancia magnética funcional (RMf) mide la actividad del cerebro de manera no invasiva, pero lo hace con lentitud y una pobre resolución espacial. Cada elemento de la imagen, o vóxel (píxel tridimensional), se compone de unas 80.000 neuronas. Además, la RMf no sigue la actividad neural de forma directa, sino que identifica tan solo cambios secundarios del flujo sanguíneo en los vóxeles.

Solo podremos entender los mecanismos que intervienen en la percepción de una flor si examinamos la actividad eléctrica de los circuitos cerebrales, formados por miles de neuronas

Para tener una idea de los patrones emergentes de la actividad cerebral hacen falta nuevos dispositivos que permitan analizar grupos de miles de neuronas. La nanotecnología, que trabaja con materiales a veces de menor tamaño que el de una molécula, puede ayudar a realizar registros a gran escala. Se han construido prototipos de matrices que incorporan más de 100.000 electrodos sobre una base de silicio; tales dispositivos permitirían medir la actividad eléctrica de decenas de miles de neuronas en la retina. Si se perfecciona la técnica, se podrán apilar las matrices en estructuras tridimensionales, reducir los electrodos para evitar el daño tisular y alargar las vías para llegar a zonas profundas de la corteza cerebral, la capa más externa del cerebro. Tales avances harían posible analizar miles de neuronas de un paciente e identificar a la vez las propiedades eléctricas de cada célula.

Los electrodos representan solo una de las maneras de estudiar la actividad de las neuronas. En los laboratorios se están empezando a emplear otros métodos no basados en sensores eléctricos. Los biólogos han tomado prestadas las técnicas desarrolladas por físicos, químicos y genetistas y están comenzando a visualizar neuronas vivas en animales despiertos que realizan sus actividades cotidianas.

Una muestra de lo que nos puede deparar el futuro la aportó el año pasado Misha Ahrens, del Instituto Médico Howard Hughes en Ashburg, Virginia, tras obtener imágenes microscópicas del cerebro de una larva de pez cebra. Se trata de uno de los organismos favoritos de los neurobiólogos porque es trans-

parente durante la fase larvaria, lo que permite una inspección fácil de sus entrañas, incluido el cerebro. En el experimento, las neuronas del pez fueron modificadas genéticamente para que emitieran luz fluorescente cuando los iones de calcio entraran en una célula que se había activado. Un tipo novedoso de microscopio proyectaba una lámina de luz sobre todo el cerebro mientras una cámara tomaba cada segundo fotos de las neuronas que iban iluminándose.

Esta técnica, conocida como obtención de imágenes del calcio (*calcium imaging*) y empleada por primera vez por uno de nosotros (Yuste) para medir la actividad eléctrica de circuitos neurales, permitió examinar el 80 por ciento de las 100.000 neuronas del pez cebra. Cuando el animal se hallaba en reposo, numerosas regiones de su sistema nervioso se activaban y desactivaban siguiendo un misterioso patrón. Desde que Berger introdujera el empleo del EEG, se ha sabido que el sistema nervioso se halla casi siempre activo. El experimento con el pez cebra abre la esperanza de que nuevas técnicas puedan ayudar a encarar el mayor reto de la neurociencia: saber interpretar la excitación espontánea y persistente de grandes grupos de neuronas.

El experimento del pez cebra es tan solo el comienzo, porque todavía se necesitan mejores métodos para descubrir cómo la actividad cerebral da lugar al comportamiento. Hace falta diseñar nuevos microscopios que permitan visualizar de forma simultánea la actividad neural en tres dimensiones. Además, la técnica de imagen del calcio resulta demasiado lenta para seguir la rápida descarga de las neuronas y no puede medir las señales inhibidoras que aplacan su actividad eléctrica.

Los neurofisiólogos, en colaboración con genetistas, físicos y químicos, están tratando de mejorar las técnicas ópticas para que, en lugar de responder al calcio, registren la actividad neural mediante la detección de cambios en el voltaje de membrana. Los tintes que varían sus propiedades ópticas al fluctuar el voltaje, ya sea depositados en el interior de la neurona o insertados mediante ingeniería genética en la propia membrana celular, podrían ayudar a perfeccionar la técnica de imagen del calcio. Este otro método, conocido como obtención de imágenes del potencial (*voltage imaging*), permitiría en última instancia determinar la actividad de cada célula en un circuito neural completo.

No obstante, tal método se halla todavía en sus albores. Es necesario mejorar la capacidad de los tintes para cambiar de color u otras propiedades en respuesta al impulso nervioso. Además, los colorantes deben ser diseñados de manera que no dañen a la neurona. Los biólogos moleculares ya se están creando sensores de potencial codificados por genes; las células leen una secuencia genética para producir una proteína fluorescente que se transporta a la membrana externa. Una vez allí, la proteína varía la intensidad de fluorescencia en respuesta a los cambios en el potencial de la neurona.

Como ocurría con los electrodos, tal vez resulten útiles algunos materiales no biológicos procedentes de la nanotecnología. En lugar de emplear tintes orgánicos o indicadores genéticos, puede crearse un nuevo tipo de sensores de potencial a partir de puntos cuánticos (pequeñas partículas semiconductoras que presentan efectos cuánticos y cuyas propiedades ópticas, como el color o la intensidad de la luz emitida, pueden modificarse con precisión). Los nanodiamantes, otro nuevo material importado de la óptica cuántica, exhiben una alta sensibilidad a los cambios en los campos eléctricos que tienen lugar cuando la actividad de una célula fluctúa. Las nanopartículas también podrían combinarse con los tintes orgánicos tradicionales o los creados mediante ingeniería genética para producir moléculas híbridas. En estas una nanopartícula serviría de «antena» para amplificar las señales de baja intensidad producidas por los tintes fluorescentes cuando una neurona se activa.

ESTUDIO EN PROFUNDIDAD

Otra dificultad técnica a la hora de visualizar la actividad neural radica en la iluminación, y la recepción de la luz reflejada, de los circuitos neurales situados más allá de la superficie de la corteza cerebral. Para solucionar tal problema, los neurotecnólogos están iniciando colaboraciones con investigadores en óptica computacional, ingeniería de materiales y medicina, quienes también necesitan ver a través de objetos sólidos de una manera no invasiva, ya sea la piel, el cráneo o un chip de ordenador. Se sabe desde hace tiempo que parte de la luz que incide sobre un objeto sólido se dispersa y que los fotones dispersados pueden, en principio, revelar detalles sobre el objeto que los refleja.

La luz de una linterna que atraviesa una mano y emerge como un destello difuso no ofrece ningún indicio sobre la localización de los huesos o vasos sanguíneos bajo la piel. Pero la información sobre el recorrido que esta sigue a través de la mano no se ha perdido por completo. Las ondas lumínicas desordenadas se dispersan e interfieren las unas con las otras. Este patrón de luz puede ser registrado con una cámara, y con nuevos métodos informáticos puede reconstruirse una imagen de lo que hay debajo. La técnica fue empleada por Rafael Piestun y sus colaboradores, de la Universidad de Colorado en Boulder, para ver a través de un material opaco. Tales métodos pueden combinarse con otros, como los usados en astronomía para corregir las distorsiones ópticas causadas por la atmósfera en la luz de las estrellas. La llamada óptica computacional puede ayudar a visualizar el destello fluorescente de los tintes cuando las neuronas ubicadas más allá de la superficie del cerebro se activan.

Algunos de estos métodos ópticos ya se han aplicado con éxito para examinar el cerebro de animales y de personas a los que se ha retirado una parte del cráneo, lo que ha permitido observar más de un milímetro de la corteza cerebral. Si se perfeccionan, podrían llegar a emplearse para mirar a través del cráneo. Sin embargo, no pueden penetrar lo suficiente en el cerebro como para detectar sus estructuras profundas. Pero una invención reciente ayudaría a solucionar esta dificultad. Mediante una técnica llamada microendoscopia, los neurorradiólogos insertan un tubo estrecho y flexible en la arteria femoral y lo hacen llegar a muchas partes del cuerpo, incluido el cerebro; de este modo, las microscópicas guías luminosas introducidas en el tubo pueden realizar su función. En 2010, un grupo del Instituto Karolinska de Estocolmo presentó un dispositivo (*extroducer*) que permite perforar con seguridad la arteria o el vaso por el que se introduce el endoscopio, lo que hace que cualquier parte del cerebro, no solo los vasos sanguíneos, sean accesibles a distintas técnicas de formación de imágenes o de registro eléctrico.

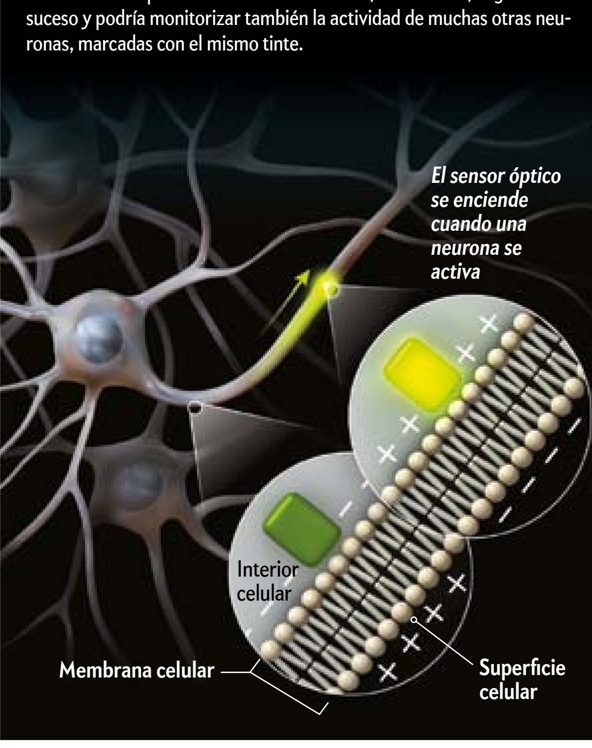
Los electrones y los fotones son las opciones más obvias para medir la actividad del cerebro, pero no las únicas. Las técnicas basadas en ADN podrían, en un futuro lejano, desempeñar también un importante papel en la monitorización de la actividad neural. Uno de nosotros (Church) se ha inspirado en el campo de la biología sintética, que trata los componentes biológicos como si fueran partes de una máquina. A medida que la investigación avanza, podrían modificarse genéticamente animales de laboratorio para que sintetizaran un «teletipo molecular», una sustancia que cambia de una manera específica y detectable cuando una neurona se activa. Podríamos imaginar que el teletipo fuera una enzima como la ADN polimerasa. Esta

Escuchar el parloteo de millones de neuronas

Se necesitan medios más eficientes y menos agresivos para estudiar los circuitos nerviosos, en los que las señales eléctricas pasan de una neurona a la siguiente. Una serie de técnicas, algunas ya en uso y otras aún muy incipientes, permitirían registrar miles o incluso millones de células. Tales invenciones sustituirán a los lentos e imprecisos métodos que a menudo requieren el uso de sondas eléctricas invasivas.

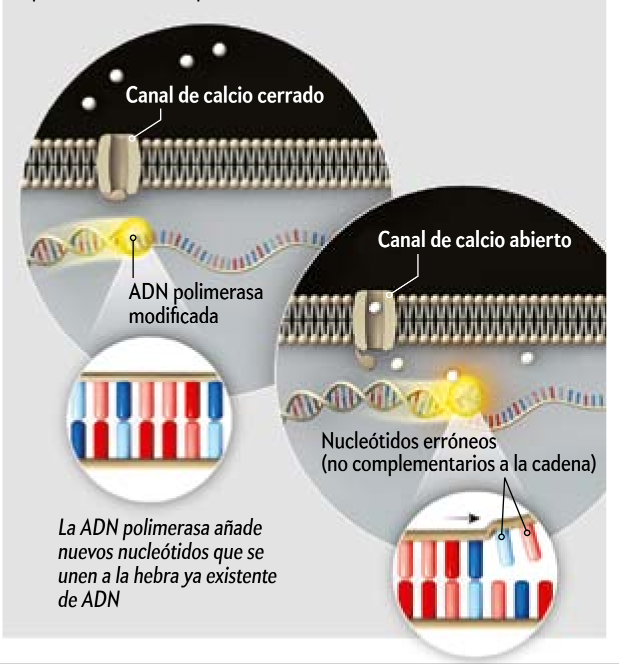
Imágenes del potencial

Se introduce un tinte en una neurona para determinar si la célula está activa. Este sensor emite luz fluorescente cuando el campo eléctrico a lo largo de la membrana celular invierte su carga en respuesta a una señal eléctrica que la atraviesa. Un detector (*no mostrado*) registra el suceso y podría monitorizar también la actividad de muchas otras neuronas, marcadas con el mismo tinte.



Teletipos de ADN

Una estrategia muy novedosa es el teletipo molecular. Cerca de la superficie interna de la célula se introduce una hebra sencilla de ADN con una secuencia conocida de letras, o nucleótidos. Una enzima, la ADN polimerasa, añade entonces nuevos nucleótidos para formar una molécula de doble cadena (*izquierda*). Cuando una neurona se excita, el flujo de entrada de iones de calcio a través de un canal de membrana recién abierto hace que la enzima añada nucleótidos erróneos (*derecha*), un fallo que se detecta en una posterior secuenciación del ADN.



comenzaría por construir una larga hebra de ADN que se uniría a otra con una secuencia preestablecida de nucleótidos (las «letras», o elementos básicos, del ADN). Una entrada de iones de calcio, generada por la descarga de la neurona, causaría que la polimerasa produjera una secuencia de letras diferente; dicho de otro modo, provocaría errores en el orden esperado de los nucleótidos. Más tarde, se secuenciaría la doble cadena de nucleótidos resultante en cada neurona del cerebro de un animal de experimentación. Una innovadora técnica, la secuenciación fluorescente in situ, mostraría un registro de los distintos tipos de fallos. Los errores del teletipo original pueden relacionarse con la intensidad o el tiempo de descarga de cada una de las neuronas en cierto volumen de tejido. En 2012, el laboratorio de Church demostró la viabilidad de esta idea al utilizar un teletipo de ADN que se alteraba con iones de magnesio, manganeso o calcio.

En el futuro la biología sintética se plantea usar células artificiales como centinelas que patrullarían por el cuerpo humano. Una célula transgénica podría servir a modo de electrodo biológico, con un diámetro mucho más pequeño que el de un pelo, que se colocaría cerca de una neurona para detectar su activación. El patrón de la descarga podría registrarse en un circuito nanométrico integrado en la célula sintética, que transmitiría los datos recogidos a través de una conexión inalámbrica a un ordenador cercano. Estos dispositivos nanométricos, un híbrido formado por partes electrónicas y biológicas, podrían recargarse por ultrasonidos o incluso con glucosa, adenosin trifosfato u otra molécula del medio interno celular.

INTERRUPTORES QUE SE ENCIENDEN Y APAGAN

Para entender lo que sucede en la vasta red de circuitos nerviosos, hace falta algo más que imágenes instantáneas. Se necesita poder activar y desactivar a voluntad grupos de neuronas concretos para ver qué ocurre en ellas. La optogenética, una técnica ampliamente utilizada en los últimos años, consiste en modificar genéticamente animales de tal manera que sus neuronas produzcan proteínas fotosensibles derivadas de bacterias o algas. Cuando se exponen a una luz de una determinada longitud de onda a través de una fibra óptica insertada, estas proteínas hacen que las neuronas se activen o desactiven. Tales técnicas se han utilizado para activar los circuitos neurales asociados al placer y otras respuestas de recompensa, así como a los movimientos

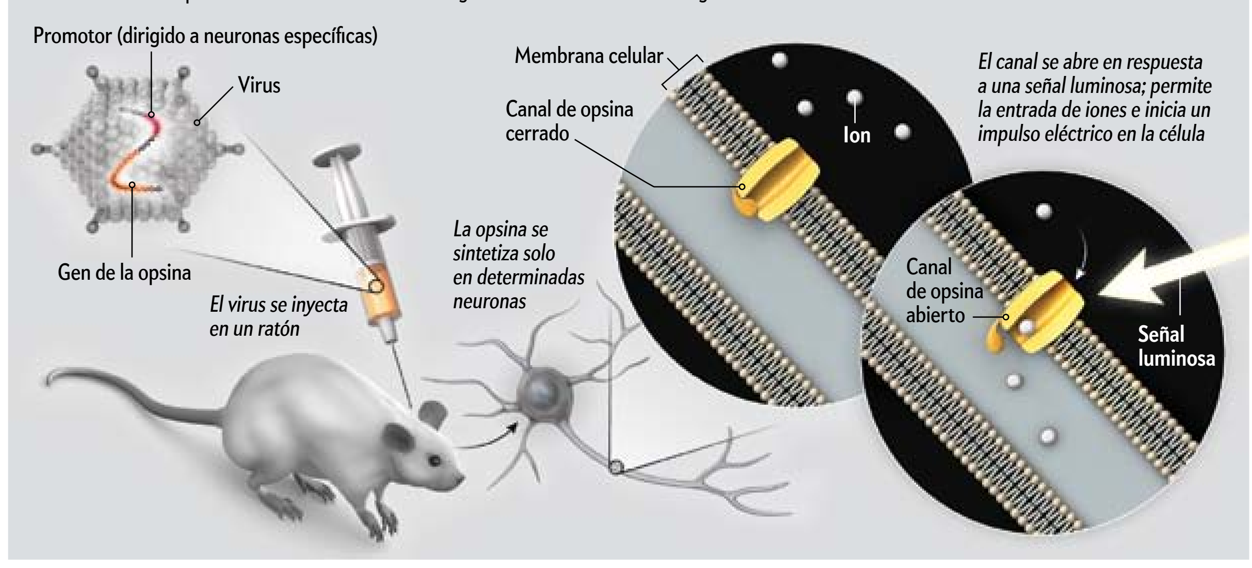
EMILY COOPER (*ilustraciones*)

Inserción de un interruptor neural

Más allá de observar las corrientes eléctricas que fluyen por los circuitos, los neurocientíficos desearían poder activar y desactivar a voluntad circuitos individuales, con lo que podrían controlar ciertas formas de actividad cerebral. Quizás un día estas técnicas emergentes, dos de ellas basadas en señales ópticas (*abajo*), lleguen a aplacar las crisis epilépticas o los temblores del párkinson.

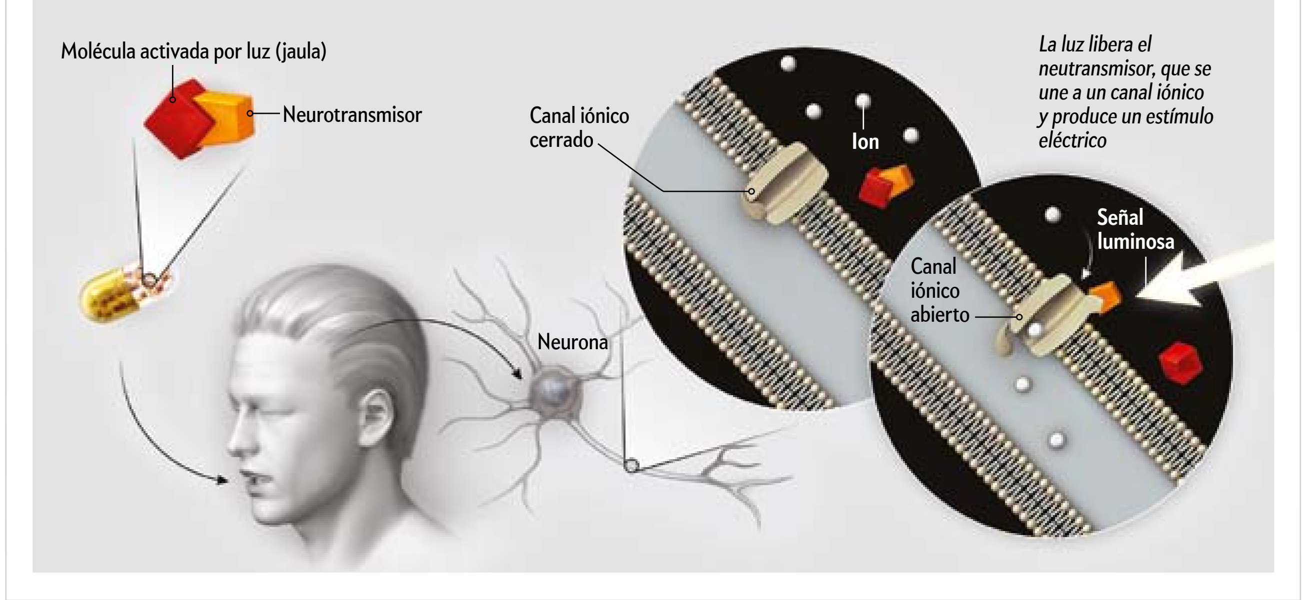
Cómo funciona la optogenética

Como el término indica, la señalización óptica y la ingeniería genética se combinan para activar un circuito cerebral en un ser vivo. Primero, un gen que codifica una proteína fotosensible, una opsina, se introduce en un virus que, inyectado en un animal, hace llegar el gen a las neuronas. Una secuencia promotora en el ADN del material genético insertado asegura que solo ciertas células sinteticen la opsina, un canal iónico, y la inserten en sus superficies de membrana. Una señal desde una fibra óptica colocada en el cráneo de un ratón abre el canal; como consecuencia, los iones cargados entran en la neurona y se origina una corriente a lo largo de la célula.



Cómo funciona la optoquímica

Esta técnica no necesita de la engorrosa ingeniería genética. El paciente ingiere un comprimido que contiene una jaula molecular, una sustancia que se activa con la luz y se halla unida a un neurotransmisor. Cuando el contenido del comprimido llega al cerebro, un pulso de luz emitido por un endoscopio, o desde fuera del cráneo, libera el neurotransmisor, que se fija a la membrana celular y abre un canal que permite la entrada de iones. Estos provocan la excitación de la neurona, que envía un impulso eléctrico a través de la célula.



alterados característicos del párkinson. La optogenética se ha usado incluso para «implantar» recuerdos en ratones.

Debido a que se basa en la ingeniería genética, la optogenética puede requerir largos protocolos de aprobación antes de que pueda ser ensayada o empleada en terapias para humanos. Una alternativa más práctica para determinadas aplicaciones consiste en unir neutrotransmisores (las moléculas que regulan la actividad de las neuronas) a una sustancia fotosensible, denominada «jaula molecular». Esta se desintegra como consecuencia de la exposición a la luz, con lo que el neurotransmisor se libera y se vuelve operativo. En un estudio realizado en 2012, Steven Rothman, de la Universidad de Minnesota, en colaboración con el laboratorio de Yuste, empleó jaulas de rutenio asociadas con GABA, un neurotransmisor que disminuye la actividad neural. Las introdujo en la corteza cerebral expuesta de ratas a las que se provocaban crisis epilépticas mediante métodos químicos. Un pulso de luz azul sobre el cerebro producía la liberación de GABA y calmaba las crisis. Ya se están utilizando técnicas optogenéticas similares para investigar la función de determinados circuitos neurales. Si se desarrollan más, podrían servir para tratar algunos trastornos neurológicos y mentales.

Todavía hay un largo trecho entre la investigación básica y las aplicaciones clínicas. Cada nueva idea que surja para medir y manipular la actividad nerviosa a gran escala deberá ser comprobada primero en moscas del vinagre, gusanos y roedores, antes de ensayarse en humanos. Una intensa investigación podría llevar a visualizar y controlar una gran parte de las 100.000 neuronas del cerebro de la mosca del vinagre en quizás unos diez años. Algunas técnicas, como el uso de electrodos finos para corregir disfunciones en circuitos neurales de pacientes con depresión o epilepsia, podrían introducirse en la práctica clínica en unos pocos años, pero otras necesitarán una década o más.

A medida que los métodos ganen en complejidad, los investigadores necesitarán gestionar y compartir enormes conjuntos de datos. Visualizar la actividad de todas las neuronas de la corteza cerebral de un ratón podrá generar en una hora 300 teraoctetos de datos comprimidos. Pero ello no supone una tarea imposible. Construir instalaciones de investigación, similares a observatorios astronómicos, centros genómicos y aceleradores de partículas, permitirá adquirir, integrar y distribuir la ingente cantidad de datos. Así como el Proyecto Genoma Humano impulsó la bioinformática para que manejara los datos de la secuenciación genómica, la disciplina de la neurociencia computacional podría descodificar el funcionamiento de sistemas nerviosos enteros.

El análisis de petaoctetos de datos hará algo más que poner orden a la multitud de nueva información; podrá sentar las bases de nuevas teorías sobre cómo se traduce la cacofonía de impulsos nerviosos en la percepción, el aprendizaje o la memoria. También permitirá confirmar o deshacer hipótesis que anteriormente no podían ser comprobadas. Una teoría fascinante postula que las numerosas neuronas implicadas en la actividad de un circuito producen ciertas secuencias de impulsos, conocidas como atractores, que corresponderían a procesos cerebrales emergentes (un pensamiento, un recuerdo o una decisión). En un estudio reciente, un ratón debía decidir si atravesar una sección u otra en un laberinto virtual proyectado en una pantalla. La acción estimuló docenas de neuronas, las cuales exhibieron cambios dinámicos de actividad semejantes a los de un atractor.

Una mayor comprensión de los circuitos neurales podría mejorar el diagnóstico de enfermedades como el alzhéimer o el autismo y proporcionar un mayor entendimiento de sus causas. En lugar de diagnosticarlas y tratarlas solo por sus síntomas, los médicos podrían buscar las alteraciones en la actividad de los circuitos responsables de cada trastorno y administrar terapias para corregir esas anomalías. Sin duda, el conocimiento de las causas de las enfermedades conllevará beneficios económicos para la medicina y la biotecnología. Como ocurrió con el Proyecto Genoma Humano, habrá que resolver cuestiones éticas y legales, en especial si se llega a identificar y alterar los estados mentales (lo que precisará salvaguardar el consentimiento y la privacidad de los pacientes).

No obstante, para que los distintos proyectos sobre el cerebro tengan éxito, los científicos y sus patrocinadores deben centrarse en el objetivo de visualizar y controlar los circuitos neurales. La idea de la Iniciativa BRAIN surgió de un artículo publicado en la revista *Neuron* en junio de 2012. En él, nuestro grupo y otros autores sugerimos una colaboración a largo plazo entre físicos, químicos, nanocientíficos, biólogos moleculares y neurocientíficos para desarrollar un mapa de la actividad cerebral, el cual se elaboraría tras aplicar nuevas técnicas que registraran y controlaran la actividad eléctrica de circuitos neurales completos.

Insistimos en que, a medida que el ambicioso proyecto BRAIN evoluciona, se conserve nuestra idea inicial de crear métodos innovadores. El ámbito de investigación del cerebro es muy amplio, y la iniciativa podría fácilmente degenerar en una lista de deseos diversos que intentan satisfacer los intereses de las numerosas subdisciplinas de la neurociencia. Se convertiría entonces en poco más que un complemento a los proyectos que se están llevando a cabo en muchos laboratorios que trabajan de manera independiente.

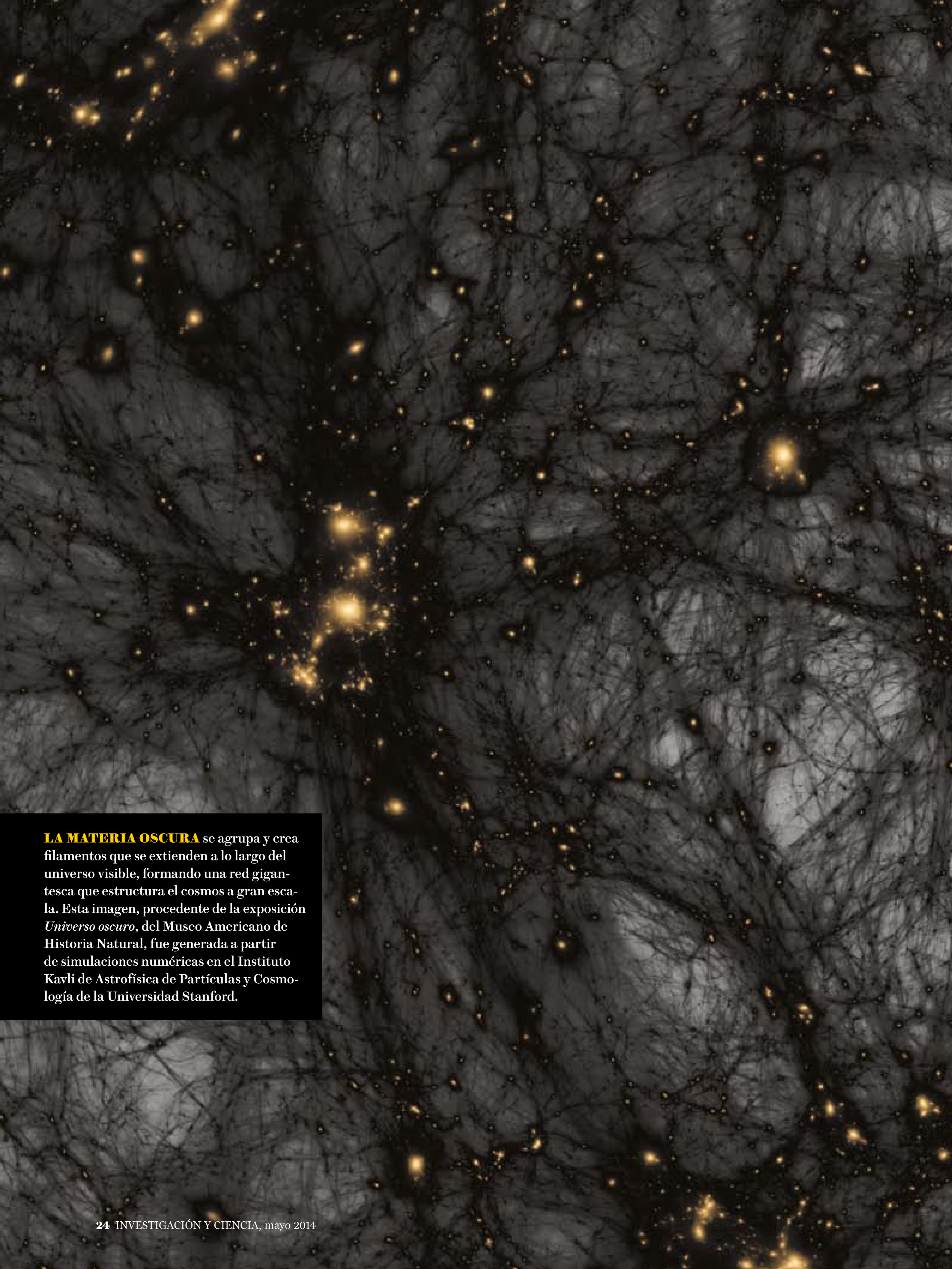
Si así sucede, el progreso será puramente fortuito y los mayores retos técnicos podrían frustrarse. El desarrollo de instrumentos que permitan visualizar de forma simultánea la descarga eléctrica de millones de neuronas en regiones enteras del cerebro solo puede lograrse con el esfuerzo continuado de un gran equipo interdisciplinario. Las nuevas técnicas podrían entonces alojarse en grandes instalaciones, semejantes a un observatorio, para ser compartidas por la comunidad neurocientífica. Creemos que sin estas herramientas innovadoras, la neurociencia seguirá atascada y no será capaz de detectar las propiedades emergentes del cerebro que subyacen a un sinfín de comportamientos. La mejor capacidad para entender y usar el lenguaje de las neuronas es el modo más productivo de construir una gran teoría sobre el funcionamiento de la máquina más compleja de la naturaleza.

PARA SABER MÁS

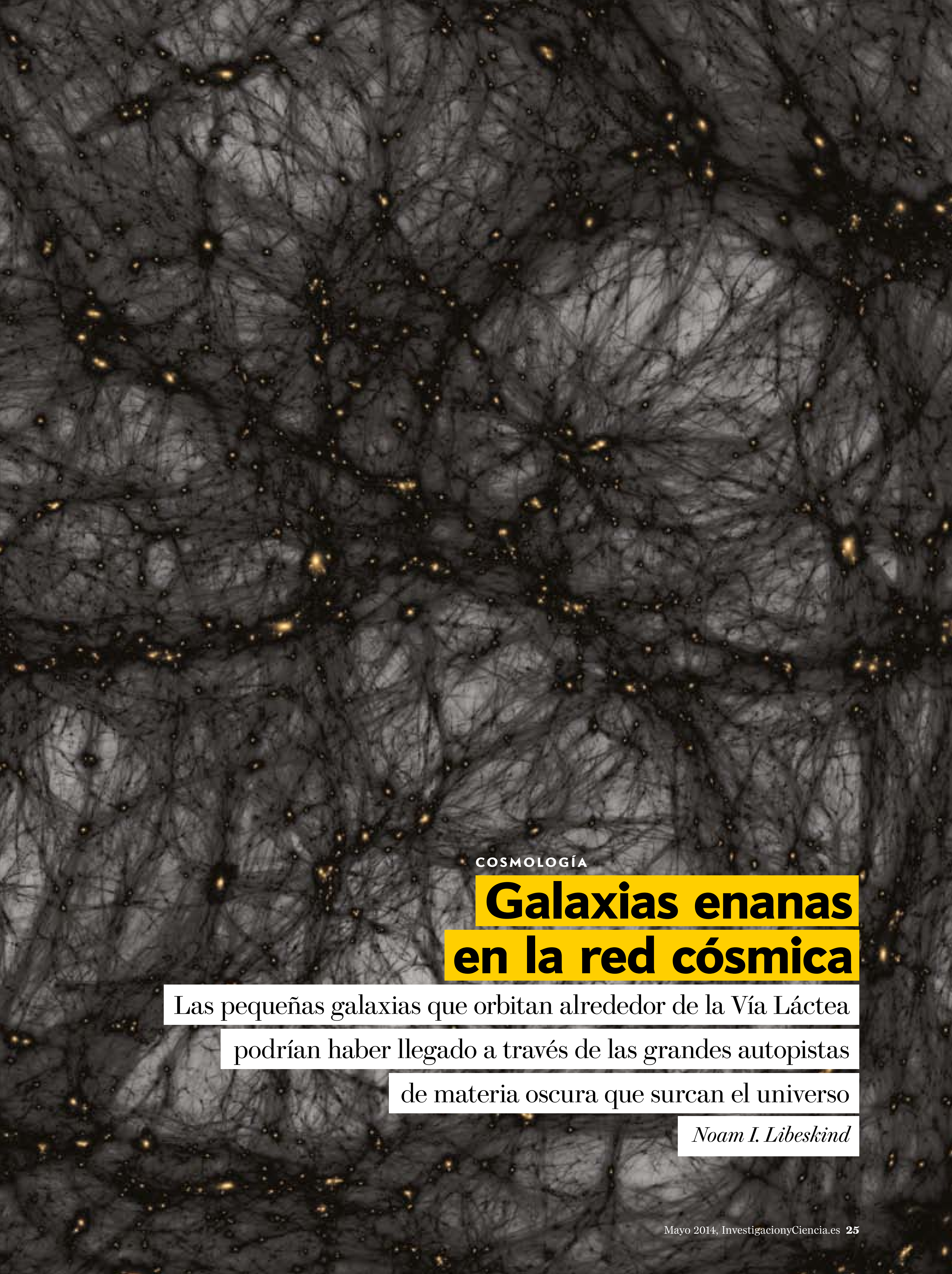
The brain activity map project and the challenge of functional connectomics. A. Paul Alivasatos et al. en *Neuron*, vol. 74, n.º 6, págs. 970-974, 21 de junio de 2012.
The NIH brain initiative. Thomas R. Insel et al. en *Science*, vol. 340, págs. 687-688, 10 de mayo de 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

Control del cerebro por medio de la luz. K. Deisseroth en *IyC*, enero de 2011.
El proyecto cerebro humano. H. Markram en *IyC*, agosto de 2012.
Luz en la maraña neuronal. J. Marschall en *MyC* n.º 59, 2013.
La ofensiva cerebral. U. Gebhardt en *MyC* n.º 65, 2014.
Objetivo: descifrar el cerebro. A. Abbott en *MyC* n.º 65, 2014.



LA MATERIA OSCURA se agrupa y crea filamentos que se extienden a lo largo del universo visible, formando una red gigantesca que estructura el cosmos a gran escala. Esta imagen, procedente de la exposición *Universo oscuro*, del Museo Americano de Historia Natural, fue generada a partir de simulaciones numéricas en el Instituto Kavli de Astrofísica de Partículas y Cosmología de la Universidad Stanford.



COSMOLOGÍA

Galaxias enanas en la red cósmica

Las pequeñas galaxias que orbitan alrededor de la Vía Láctea podrían haber llegado a través de las grandes autopistas de materia oscura que surcan el universo

Noam I. Libeskind

Noam I. Libeskind investiga en el Instituto Leibniz de Astrofísica de Potsdam. Su trabajo se centra en el desarrollo de modelos computacionales del universo.



«¡Qué disparate! ¡Paparruchas!»,

prorrumpió Pavel Kroupa, reputado astrónomo de la Universidad de Bonn, mientras yo seguía en pie frente al auditorio. Por aquel entonces no era más que un estudiante de doctorado que, en busca de una plaza posdoctoral, había acudido a Bonn para dar una charla de 45 minutos sobre mis investigaciones acerca de las pequeñas galaxias satélite que rodean a la Vía Láctea. Había contribuido a desarrollar una teoría que explicaba por qué estos misteriosos objetos parecen situarse a lo largo de una recta que atraviesa el cielo de lado a lado: un alineamiento inesperado y desconcertante. Daba la impresión de que a Kroupa no terminaban de convencerle mis argumentos.

La mayoría de las galaxias de gran tamaño, como la Vía Láctea, se encuentran rodeadas por docenas de pequeñas galaxias satélite. Se trata de objetos muy tenues: por el momento, los astrónomos solo han conseguido identificar las más brillantes y cercanas, tanto alrededor de la Vía Láctea como en Andrómeda. Pero, además, ocurre que tales galaxias enanas no se limitan a pulular sin orden ni concierto, sino que se encuentran contenidas en un plano relativamente delgado.

Semejante disposición plantea todo tipo de preguntas. Según las simulaciones por ordenador, las galaxias enanas deberían distribuirse de manera más o menos uniforme en todas las direcciones del cielo. Durante largo tiempo, se pensó que esa disposición esférica era una consecuencia natural de la existencia de materia oscura: una enigmática sustancia que, hasta donde sabemos, solo interacciona con la materia ordinaria a través de la fuerza de la gravedad (en particular, no absorbe ni emite luz, de ahí su nombre). Se cree que el universo contiene una gran cantidad de materia oscura y que esta desempeña un papel fundamental tanto en la formación de galaxias como en la expansión del cosmos.

Sin embargo, el problema del alineamiento de las galaxias enanas resulta tan molesto que algunos astrónomos, como Kroupa, han llegado a cuestionar la existencia de la materia oscura. «La materia oscura es un fracaso desde que predice que las galaxias satélite deberían distribuirse de manera esférica en torno a la Vía Láctea, en clara contradicción con las observaciones», interrumpió en mi charla.

Mi propuesta intentaba explicar el peculiar alineamiento de nuestros satélites a partir de las grandes estructuras de materia oscura que surcan el cosmos: colosos mucho mayores que la Vía Láctea. Aunque Kroupa y otros expertos continúan sin estar convencidos, varias investigaciones recientes han mostrado que las gigantescas redes cósmicas de materia oscura sí podrían explicar esa insólita distribución de las galaxias enanas.

MATERIA AUSENTE

La materia oscura fue postulada por vez primera en los años treinta del siglo pasado. Por aquel entonces, el gran astrónomo Fritz Zwicky intentó evaluar la masa del cúmulo de Coma, un gigantesco conglomerado compuesto por unas mil galaxias. Zwicky comenzó midiendo la velocidad a la que se desplazaban las galaxias en el cúmulo. Para su sorpresa, las velocidades que observó resultaban tan elevadas —del orden de miles de kilómetros por segundo— que, en buena lógica, tendrían que haber desestabilizado el cúmulo. ¿Por qué la estructura no se deshacía? Zwicky concluyó que el cúmulo habría de estar repleto de alguna clase de materia invisible, la cual mantendría unidas las galaxias por efecto de su atracción gravitatoria. Esa sustancia invisible es lo que hoy denominamos materia oscura.

Desde que Zwicky formulase su hipótesis, los indicios a favor de la existencia de materia oscura se han multiplicado. No en vano, esos signos se han observado en casi todas las galaxias estudiadas. En el interior de la Vía Láctea, la presencia de materia oscura puede inferirse a partir del movimiento de las estrellas más alejadas del centro galáctico. Al igual que ocurría con las galaxias del cúmulo de Coma, las estrellas de la Vía Láctea avanzan demasiado deprisa para quedar atrapadas por la materia que sí podemos ver. Y la docena larga de galaxias enanas que rodean la Vía Láctea parecen contener una abundancia de materia oscura aún mayor.

La aparente omnipresencia de la materia oscura ha hecho que cada vez más expertos confíen en su existencia. Los cosmólogos estiman que la materia oscura constituiría más del 80 por ciento de toda la materia existente en el cosmos; es decir, superaría a la materia formada por átomos ordinarios en una proporción de cinco a uno.

Semejante abundancia implica que la materia oscura ha tenido que desempeñar un papel muy destacado en la evolución del universo. Una manera de estudiar el desarrollo del cosmos es mediante simulaciones por ordenador. Desde los años seten-

EN SÍNTESIS

Las teorías de formación de galaxias indican que la Vía Láctea tendría que estar rodeada por un halo esférico de pequeñas galaxias satélite.

Sin embargo, apenas se conocen unas pocas galaxias enanas en las inmediaciones de la Vía Láctea. Además, estas no se distribuyen de manera uniforme, sino dispuestas en un plano.

Eso ha llevado a que algunos expertos cuestionen la existencia de la materia oscura. Nuevas simulaciones parecen explicar el fenómeno a partir de la red cósmica de materia oscura.

PÁGINAS ANTERIORES: MUSEO AMERICANO DE HISTORIA NATURAL

ta del siglo pasado, los expertos en cosmología computacional han intentado recrear la historia del universo a través de programas informáticos. La técnica es sencilla: se define una caja virtual en el ordenador y se colocan en ella «partículas» imaginarias (cada una de las cuales representa una aglomeración de materia oscura), dispuestas en los nodos de un retículo casi perfecto. Después, se calcula la atracción gravitatoria que cada una de ellas ejerce sobre todas las demás y se deduce el movimiento de cada partícula a partir de la fuerza total que experimenta. Por último, se repite el proceso hasta que en el ordenador transcurra el equivalente a 13.000 millones de años. (La edad actual del universo se estima en unos 13.800 millones de años.)

Aunque las técnicas computacionales se han ido refinando desde la década de los setenta, el método básico sigue siendo el mismo. Hace cuarenta años, los programas podían calcular el movimiento de unos pocos cientos de partículas. Hoy, las simulaciones de última generación incorporan miles de millones de ellas y abarcan un volumen que corresponde a todo el universo observable.

Las simulaciones numéricas han resultado de gran utilidad para investigar galaxias aisladas, pero también han sido fuente de varios problemas. Por ejemplo, los modelos informáticos revelan que la materia oscura del halo que rodea a la Vía Láctea debería dar lugar a numerosas subestructuras. El gas y el polvo asociados a estos subhalos se contraerían bajo la acción de la gravedad, hasta acabar formando estrellas y galaxias enanas. En el caso de la Vía Láctea, el predominio de la materia oscura implica que deberían observarse miles de pequeñas galaxias. Sin embargo, cuando miramos al cielo nocturno, apenas vemos un par de docenas. Esta discrepancia entre predicciones numéricas y observaciones fue identificada por primera vez a principios de los años noventa. Desde entonces, se conoce como «el problema de los satélites desaparecidos».

Durante todos estos años, los astrónomos han propuesto varias soluciones. En primer lugar, puede que no todos los satélites que aparecen en las simulaciones se correspondan con galaxias reales. Los grumos de materia oscura de menor tamaño podrían no tener la masa mínima necesaria para acumular gas y formar estrellas. Según este razonamiento, las galaxias satélite encontradas hasta ahora serían la punta visible de un oscuro iceberg: cientos, si no miles, de satélites oscuros, carentes de estrellas, merodearían en la vecindad de la Vía Láctea. Simplemente, no podríamos verlos.

En segundo lugar, aunque cualquier grumo de materia oscura, por pequeño que fuera, pudiese crear estrellas, tal vez estas resulten demasiado débiles para detectarlas con nuestros instrumentos. Si esta hipótesis es cierta, a medida que avance la técnica y los telescopios mejoren, iremos descubriendo nuevos satélites. De hecho, el número de galaxias enanas detectadas en las inmediaciones de la Vía Láctea se ha duplicado en los últimos siete años.

Por último, el disco de la Vía Láctea podría bloquear la luz de algunas galaxias satélite. En esencia, el disco galáctico forma un plano en el que la densidad de estrellas es tan elevada que, a simple vista, el conjunto parece un fluido blanco (lo que explica el nombre de nuestra galaxia). Por tanto, resultaría muy difícil detectar las galaxias enanas situadas detrás del disco.

Para la mayoría de los astrofísicos, los argumentos anteriores zanjan en buena medida el problema de los satélites desaparecidos y, de esta manera, sortean uno de los desafíos observacio-

GEOGRAFÍA GALÁCTICA

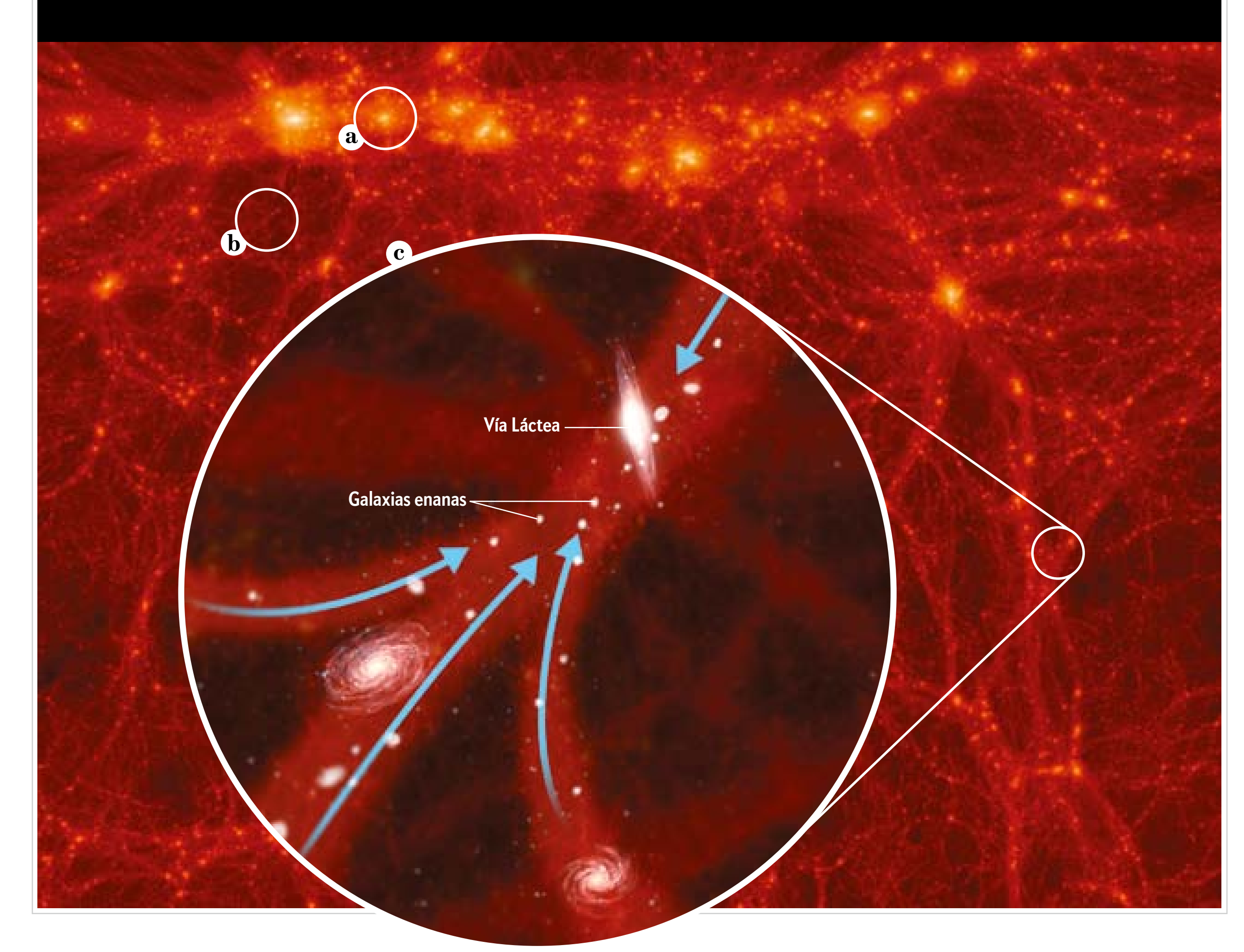
El plano galáctico imposible

Las simulaciones de la Vía Láctea predicen que las galaxias satélite cercanas deberían distribuirse de manera más o menos esférica. Sin embargo, las observaciones indican que las pocas galaxias enanas que se conocen se encuentran contenidas en un plano aproximadamente perpendicular al disco de la Vía Láctea. Varios estudios sobre la galaxia vecina de Andrómeda revelan que sus satélites también se disponen en un plano. ¿Cómo explicar ese insólito alineamiento? Nuevas simulaciones numéricas parecen indicar que la situación de los satélites podría deberse a los largos filamentos de materia oscura que surcan el universo.

FUENTE: «DWARF GALAXY PLANES: THE DISCOVERY OF SYMMETRIC STRUCTURES IN THE LOCAL GROUP», POR MARCEL S. PAWLOWSKI, PAVEL KROUPA Y HELMUT JERJEN EN *MONTHLY NOTICES OF THE ROYAL ASTRONOMICAL SOCIETY*, VOL. 435, N.º 3, 1 DE NOVIEMBRE DE 2013

Autopistas de materia oscura

Durante los aproximadamente 14.000 millones de años que han transcurrido desde la gran explosión, la materia oscura que llena el universo ha formado una gigantesca estructura filamentosa conocida como «red cósmica». La materia oscura atrae el gas y el polvo cercanos. En los nodos de la red, donde la densidad es mayor (a), se forman galaxias masivas, como la Vía Láctea. En los filamentos, la densidad de materia oscura es menor, por lo que en ellos solo se gestan galaxias más pequeñas (b). Con el transcurso del tiempo, la atracción gravitatoria que ejercen los nodos arrastra hacia ellos las galaxias enanas (c). Esta dinámica podría explicar por qué las galaxias enanas de la Vía Láctea parecen hallarse en un mismo plano.



CORTESÍA DE STEFAN GÖTTLOBER, GUSTAVO YEPES, ANATOLY KLYPIN, ARMAN KHALATYAN Y CLUES-PROJECT.ORG

nales más serios a los que se enfrenta la hipótesis de la materia oscura. Aun así, el peculiar alineamiento de las galaxias satélite continúa desconcertando a los investigadores.

LA AMENAZA DE LAS ENANAS

En una serie de artículos publicados entre finales de los setenta y principios de los ochenta, Donald Lynden-Bell, astrofísico de la Universidad de Cambridge, advirtió que muchas de las galaxias satélite que orbitan alrededor de la Vía Láctea parecían estar contenidas en un mismo plano. ¿Cómo explicar esa insólita distribución? En 2005, Kroupa y su grupo en Bonn convencieron al mundo de que dicho alineamiento no podía ser producto del azar. Supusieron que los satélites de materia oscura se encontraban distribuidos de modo uniforme alrededor de la Vía Láctea, y que solo uno de cada cien poseería la masa suficiente para concentrar estrellas y engendrar una galaxia visible. A partir de estas suposiciones, más que razonables, se preguntaron con qué frecuencia cabría esperar encontrar un sistema como el de la Vía Láctea, en el que las galaxias satélite luminosas acaban dispuestas en fila. La respuesta causó una gran conmoción entre los cosmólogos: la probabilidad era inferior a una entre un millón.

Si la materia oscura gobernase la formación de galaxias, argumentaba Kroupa, los satélites enanos nunca acabarían todos en el mismo plano. En el artículo que describía sus resultados, Kroupa propuso una manera de salir del atolladero: reconocer que los satélites no se habían formado como consecuencia de aglomeraciones de materia oscura. La materia oscura, sostenía el investigador, no existía.

Como buen teórico, Kroupa propuso una alternativa. Sugirió identificar los satélites con escombros galácticos: restos de una galaxia progenitora más antigua que habría atravesado la Vía Láctea largo tiempo atrás. Del mismo modo que un asteroide se fragmenta y deja una estela de restos a medida que atraviesa la atmósfera terrestre, tal vez los satélites de la Vía Láctea se

hubieran originado a partir del material arrancado a un progenitor de mayor tamaño.

Hace tiempo que se conocen varios sistemas de galaxias en interacción entre las que median largos puentes de materia, denominados «brazos de marea». Con frecuencia, esos brazos contienen pequeñas galaxias enanas, las cuales se forman a partir de la materia que fluye por ellos. En las condiciones adecuadas, la naturaleza de ese desgajamiento provoca que el material arrancado acabe situado en un plano delgado, tal y como ocurre con los satélites de la Vía Láctea.

La explicación de Kroupa era simple y elegante. Y, por encima de todo, controvertida. Pronto llegaron los primeros ataques. Por un lado, las estrellas de los satélites de la Vía Láctea se mueven demasiado rápido para hallarse retenidas por la materia ordinaria: todo indica que es la materia oscura la que las mantiene ligadas, tal y como ocurre en la Vía Láctea. (De hecho, las observaciones revelan que los satélites enanos de la Vía Láctea se encontrarían entre las galaxias con mayor proporción de materia oscura del universo.) La hipótesis de las galaxias enanas de marea implicaba que tales objetos estarían desprovistos de materia oscura, lo cual dejaba sin responder la pregunta de por qué no salen despedidos.

En segundo lugar, al igual que una colisión entre vehículos suele acabar destrozándolos, las colisiones entre galaxias de disco tienden a destruir los discos. El resultado final de una colisión galáctica es casi siempre una masa informe de estrellas. Sin embargo, la Vía Láctea presenta una estructura muy nítida, con un disco bastante delgado en el que no se observa ningún indicio de colisiones o fusiones en su pasado reciente.

RED OSCURA

Una solución alternativa para el inusitado alineamiento de las galaxias enanas nos obliga a ampliar nuestros horizontes cósmicos. Las simulaciones por ordenador no solo modelizan la evolución de las galaxias, sino también la de grandes volúmenes del universo. Al considerar escalas mayores, vemos que las galaxias no se distribuyen de modo aleatorio, sino que tienden a agruparse en una estructura filamentosa conocida como «red cósmica». Esa gigantesca telaraña predicha por las simulaciones se aprecia con claridad cuando cartografiamos el cielo nocturno mediante grandes muestreos astronómicos.

La red cósmica se compone de majestuosas láminas, formadas por millones de galaxias distribuidas a lo largo de cientos de millones de años luz. Unos filamentos alargados conectan las láminas y, entre ellos, median inmensos vacíos en los que no hay galaxia alguna. Las galaxias de gran tamaño, como la Vía Láctea, tienden a anclarse en los puntos de la red donde se cruzan varios filamentos.

Durante mi doctorado, en la Universidad de Durham, ejecuté varias simulaciones numéricas de esas regiones más densas. Cierto día, mostré una gráfica con los últimos resultados a mi director, Carlos Frenk. El modelo en que había estado trabajando describía la evolución de la actual Vía Láctea y su entorno durante los últimos 13.000 millones de años de historia cósmica. Frenk examinó las figuras durante unos instantes, sacudió los papeles y exclamó «¡Deja lo que estés haciendo! ¡Las galaxias satélite que estás estudiando están colocadas en el plano imposible de Kroupa!». Nuestro modelo no arrojaba las predicciones de las simulaciones numéricas previas, en las que un halo de galaxias satélite rodeaba de modo uniforme la Vía Láctea. En su lugar, predecía la formación de un plano de satélites muy similar al observado. Intuimos que estábamos empezando a descifrar el misterio de las galaxia enanas. «¿Por qué no rastreas los satélites en el tiempo y averiguas de dónde vinieron?», propuso Frenk. Teníamos el resultado final: ahora tocaba examinar los pasos intermedios de la simulación.

Cuando examinamos la simulación hacia atrás en el tiempo, comprobamos que los satélites enanos no se habían originado en las inmediaciones de la Vía Láctea. Provenían de regiones algo más alejadas, situadas sobre los filamentos de la red cósmica. La densidad de materia en estas fibras es mayor que en los vacíos cósmicos, por lo que atraen el gas y el polvo cercanos, los cuales coagulan y forman protogalaxias.

Una vez se forman las galaxias enanas, la gravedad las arrastra hacia la zona más masiva de las inmediaciones; en este caso, la Vía Láctea. Nuestra galaxia se encuentra en un cruce de filamentos. Las galaxias enanas viajan a lo largo de la hebra de materia oscura que las vio nacer y aceleran a medida que se aproximan a nosotros. Así pues, los filamentos hacen las veces de «autopistas» de materia oscura. Por tanto, cuando miramos el cielo y vemos las galaxias enanas situadas en un mismo plano y moviéndose en una misma dirección, podríamos decir que estamos contemplando el tráfico de entrada a la Vía Láctea.

COMPROBACIONES FUTURAS

Algunos científicos, como Kroupa, aún se muestran escépticos. Los modelos numéricos parecen reproducir las condiciones observadas en la vecindad de la Vía Láctea con suficiente precisión, pero la teoría general debería ser capaz de describir otros entornos galácticos.

La teoría se enfrenta ahora a una nueva prueba. En enero de 2013, los astrónomos que cartografían las inmediaciones de Andrómeda descubrieron un plano de satélites aún más fino: un vasto disco de un millón de años luz de ancho con un espesor de apenas 40.000 años luz: aproximadamente las mismas proporciones que un ordenador portátil. Ese plano parece rotar tal y como predice el modelo de marea de Kroupa; sin embargo, nuestras simulaciones numéricas aún no han sido capaces de reproducir su alineamiento.

Por otro lado, los problemas observacionales de la teoría de marea de Kroupa siguen ahí. La historia demuestra que, en este tipo de situaciones, la solución solo se alcanza con más datos. Como una vez señaló Albert Einstein, «la naturaleza nunca ha tenido entre sus obligaciones facilitarnos el descubrimiento de sus leyes».

PARA SABER MÁS

The distribution of satellite galaxies: The great pancake. Noam I. Libeskind et al. en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 363, n.º 1, págs. 146-152, octubre de 2005. Disponible en **arxiv.org/abs/astro-ph/0503400**

The preferred direction of infalling satellite galaxies in the local group. Noam I. Libeskind et al. en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 411, n.º 3, págs. 1525-1535, marzo de 2011. Disponible en **arxiv.org/abs/1010.1531**

Dwarf galaxy planes: The discovery of symmetric structures in the local group. Marcel S. Pawlowski, Pavel Kroupa y Helmut Jerjen en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 435, n.º 3, págs. 1928-1957, noviembre de 2013. Disponible en **arxiv.org/abs/1307.6210**

EN NUESTRO ARCHIVO

Galaxias enanas y materia oscura. Pavel Kroupa y Marcel Pawlowski en *IyC*, marzo de 2011.

El lado oscuro de la Vía Láctea. Leo Blitz en *IyC*, diciembre de 2011.



GEOLOGÍA

LAS ROCAS MÁS ANTIGUAS

Un grupo de geólogos sostiene que ciertas rocas halladas al norte de Canadá permitirían estudiar la infancia de nuestro planeta y el origen de la vida. Otro equipo de investigadores, sin embargo, no las considera tan especiales

Carl Zimmer

EL CINTURÓN DE ROCAS VERDES DE NUVVUAGITTUQ NO PARECE NINGÚN CAMPO DE batalla. Situado a más de 32 kilómetros de Inukjuak, la población más cercana, la formación se extiende a lo largo del margen nororiental de la bahía de Hudson, en Canadá, en un lugar pacífico y desprovisto de carreteras. Desde la orilla, el terreno se eleva en forma de suaves colinas. Unas se encuentran cubiertas por líquenes, otras muestran los rasguños causados por los glaciares durante la edad de hielo. Las rocas que afloran exhiben un complejo pero bello conjunto de estructuras plegadas y estiradas. Algunas son grises y negras, con un veteado de color claro, otras son rosadas, salpicadas de granates. Durante la mayor parte del año, solo los caribúes y los mosquitos visitan la zona.

Sin embargo, ese apacible paraje es desde hace tiempo el escenario de una contienda científica. Durante casi una década, dos grupos de geólogos han estado viajando hasta Inukjuak y cargando en canoas equipamiento de acampada y material de laboratorio, con el fin de bordear la bahía y alcanzar el cinturón. El objetivo: averiguar la verdadera edad de las rocas. Uno de los equipos, dirigido por Stephen J. Mojzsis, de la Universidad de Colorado, sostiene que rondan los 3800 millones de años. Sin duda muy antiguas, pero no más que otras conocidas.

Por su parte, Jonathan O'Neil, de la Universidad de Ottawa, y su grupo sostienen que las rocas de Nuvvuagittuq se formaron hace 4400 millones de años. De ser el caso, no solo se trataría de las rocas más antiguas jamás halladas sobre la Tierra, sino que proporcionarían una puerta única para inferir cómo se formó la superficie del planeta

TRAVIS RATHBONE

durante su violenta infancia y cuánto tardó en surgir la vida. Un capítulo clave en la biografía de nuestro planeta que, hasta hoy, ha permanecido inaccesible.

La Tierra se formó hace 4568 millones de años. Durante los primeros 500 millones de años de su historia, las insistentes lluvias dieron lugar a los océanos; poco después, las primeras masas de tierra seca emergieron sobre el nivel del mar y comenzaron a gestarse los continentes. Los cometas y los asteroides bombardeaban la Tierra. Y se cree también que un planeta fallido, del tamaño de Marte, pudo haber colisionado contra el nuestro: un cataclismo habría engendrado la Luna a partir de los restos del impacto. Pero la cronología de esos acontecimientos ha legado pocos indicios geológicos; entre ellos, unas diminutas muestras de minerales que sugieren que los océanos se habrían formado antes que la Luna. Así pues, los científicos se encuentran en la misma situación que los biógrafos de los antiguos filósofos griegos, quienes se ven obligados a extraer la máxima cantidad de información a partir de fragmentos de pergaminos e historias de segunda mano.

Pero, si O'Neil está en lo cierto y las rocas de Nuvvuagittuq tienen 4400 millones de años, la región no sería el equivalente a un fragmento de pergamino, sino a un gran libro. Las miles de hectáreas de minerales que aguardan a los expertos podrían dar respuesta a viejas preguntas. ¿Comenzó la tectónica de placas en los estadios iniciales de la Tierra, o maduró el planeta durante cientos de millones de años antes de que las cortezas continental y oceánica comenzaran a desplazarse? ¿Qué clase de química reinó en los primeros océanos y en la atmósfera primitiva? Una vez formado el planeta, ¿cuánto tardó en aparecer la vida?

Si la razón está de parte de Mojzsis, el primer capítulo de la historia de la Tierra continuará oculto. Si la conclusión correcta es la de O'Neil, las rocas de Nuvvuagittuq se convertirán en uno de los tesoros más preciados de la geología.

ATRAPADOS EN ROCA

Al igual que las rocas que componen gran parte de la corteza terrestre, las de Nuvvuagittuq se formaron a partir de dos procesos principales. En unos casos, las finas partículas depositadas sobre el fondo oceánico se comprimieron hasta originar estratos de roca sedimentaria. En otros, el magma ascendió desde el manto terrestre y, en su recorrido, se enfrió y cristalizó para formar rocas ígneas.

En lo que se refiere a la antigua corteza del planeta, hasta nosotros solo han llegado intactos unos pocos fragmentos, como Nuvvuagittuq. El resto ha desaparecido. Algunas rocas se erosionaron por efecto de la lluvia y el viento y regresaron al océano, donde volvieron a sedimentar. En otros casos, los procesos tectónicos se encargaron de hundirlas de nuevo bajo la corteza y sumergirlas en el manto, donde se fundieron y perdieron su identidad original. Sus átomos se mezclaron con el magma y volvieron a ascender en forma de nuevas rocas.

Otras partes de la Tierra primitiva fueron aniquiladas por los enormes asteroides, que, al caer sobre el planeta, fundían enormes porciones de corteza. Hace unos 4400 millones de años, una colisión, conocida como el Gran Impacto, arrancó una ingente cantidad de material que, más tarde, daría lugar a la Luna. «El Gran Impacto probablemente dejase la Tierra en un estado más que catastrófico», señala Richard W. Carlson, del Instituto Carnegie para la Ciencia. «Nadie hubiera querido estar aquí, sino contemplarlo desde Venus.»

A la vista de todos esos episodios de destrucción, no resulta extraño que las muestras de roca de aquella época escaseen. A ello se debe el valor de los hallazgos de Nuvvuagittuq y la acalorada polémica que los acompaña: solo en contados lugares del planeta se han encontrado rocas de 3800 millones de años de edad. La más antigua, hallada en la región canadiense de los Territorios del Noroeste, data de hace 3920 millones de años.

Como consecuencia de tal escasez, los geólogos se han visto obligados a buscar otras pistas que revelen el estado de nuestro planeta durante sus primeros cientos de millones de años. Algunas de ellas proceden del estudio de circones: cristales de circonio muy resistentes que, en ocasiones, se forman durante el enfriamiento del magma. Cuando la roca resultante se erosiona, algunos circones permanecen intactos incluso después de depositarse en el fondo marino e incorporarse a las rocas sedimentarias más jóvenes.

Los enlaces químicos de los circones pueden capturar elementos radiactivos, como el uranio. La desintegración de estas sustancias procede a un ritmo muy regular, lo que permite a los geólogos calcular la edad del mineral que los contiene. Además, los cristales atrapan también otros elementos químicos, a partir de los cuales pueden obtenerse indicios sobre el aspecto que presentaba el planeta en el momento de su formación. «Los circones resultan fascinantes: son cápsulas de tiempo», observa Mojzsis.

En Australia se han encontrado rocas sedimentarias salpicadas de circones con una antigüedad inmemorial. Algunos de ellos —aunque no así la roca a la que pertenecen— datan de hace más de 4400 millones de años, lo que los convierte en los restos más antiguos de nuestra historia geológica hallados hasta el momento. Desde que fueran descubiertos en 2001, los expertos han sabido extraer de ellos información muy notable. Su estructura indica que la roca que albergó su formación se solidificó a más de seis kilómetros de profundidad. Mojzsis y sus colaboradores también han hallado en los circones australianos huellas químicas de agua.

Carl Zimmer es periodista científico especializado en ciencias de la vida. Es columnista del *The New York Times* y autor de trece libros; entre ellos, *Evolution: Making sense of life*, escrito junto con el biólogo Douglas Emlen.



EN SÍNTESIS

Ciertas rocas de la bahía de Hudson, en Canadá, podrían ser las más antiguas jamás encontradas. Los expertos discuten si su edad asciende a 3800 o a 4400 millones de años.

La conclusión del debate dependerá del desarrollo de mejores métodos para datar pequeñas muestras minerales engendradas durante los primeros estadios de formación de la Tierra.

Si las polémicas rocas se hubiesen originado hace 4400 millones de años, podrían aportar información muy valiosa sobre el proceso de formación de la Tierra y sobre el origen de la vida.





LA ROCA DE LA DISCORDIA: Jonathan O'Neil (*izquierda*) insiste en que las rocas de Nuvvuagittuq datan de hace 4400 millones de años. Stephen J. Mojzsis (*derecha*) defiende que su edad no pasa de 3800 millones de años.

TRAVIS RATHBONE (*izquierda*), JAMIE KRIPKE (*derecha*)

Cualquier dato que los científicos puedan obtener de los circones contenidos en rocas sedimentarias reviste sin duda gran valor. Sin embargo, esa información palidece comparada con la que cabría extraer de la roca original en la que crecieron. Una roca contiene gran cantidad de minerales que, en conjunto, pueden revelar mucho más sobre las características de la Tierra durante sus estadios de formación. «Sin las rocas, la historia nunca está completa», apunta Larry Heaman, de la Universidad de Alberta. Un comentario que nos lleva de vuelta a Nuvvuagittuq.

PURA SUERTE

A finales de la década de los noventa, el Gobierno de Quebec inició una campaña geológica de gran alcance con el objetivo de confeccionar la primera cartografía detallada del extremo septentrional de la provincia. La estructura de la región recuerda a una cebolla, ya que presenta núcleos antiguos de corteza continental rodeados por capas rocosas más recientes. Según las dataciones, la edad de la mayor parte de ellas asciende a unos 2800 millones de años. Sin embargo, Pierre Nadeau, por entonces doctorando de la Universidad Simon Fraser, en la Columbia Británica, obtuvo una muestra de 3800 millones de años de antigüedad. Por pura suerte, lo habían enviado al cinturón de rocas verdes de Nuvvuagittuq. «Encontrar esas rocas es como tener una joya en la mano», explicaba en 2002 a la BBC Ross Stevenson, excolaborador de Nadeau, tras la publicación de sus resultados.

Poco después otros geólogos comenzaron a viajar a Nuvvuagittuq. Entre aquellos peregrinos se encontraba O'Neil, que por entonces realizaba su tesis doctoral en la Universidad McGill. Le sorprendió que las características químicas de las rocas de Nuvvuagittuq resultasen similares a las de ciertas rocas de 3800 millones de años halladas en Groenlandia. En el pasado, tal vez hubiesen pertenecido a la misma masa continental.

Para examinarlas, O'Neil solicitó la ayuda de Carlson, experto en análisis de rocas antiguas. Para calcular la edad de una roca, los expertos miden la cantidad de isótopos radiactivos que contiene. Algunos de ellos corresponden a variedades atómicas que formaban parte de la nube de polvo que dio origen al sistema solar y que, más tarde, se incorporaron a planetas y meteoritos. Así, cuando cristalizaron las rocas de la Tierra, quedaron atrapados en su interior. Una muestra de isótopos radiactivos se desintegra a un ritmo muy regular, por lo que al medir las concentraciones actuales puede inferirse la edad de la roca.

En el Instituto Carnegie, O'Neil y Carlson calcularon las abundancias de varios isótopos en las muestras de Nuvvuagittuq. Fue entonces cuando se percataron de que había algo extraño. Entre sus hallazgos figuraba el neodimio 142, un isótopo procedente de la desintegración del samario 146. En la Tierra ya no quedan restos naturales de samario 146, ya que, según varias estimaciones, su período de semidesintegración apenas asciende a 68 millones de años. «Hace tiempo que desapareció. Esa especie estuvo presente durante la creación de la Tierra porque fue inyectada por la supernova que desencadenó la formación del sistema solar, pero 500 millones de años después ya no quedaba rastro de ella», señala Carlson.

En las rocas de Nuvvuagittuq, Carlson y sus colaboradores observaron que ejemplares diferentes presentaban distintas proporciones de neodimio 142 y otros isótopos del mismo elemento. Esas variaciones solo podían explicarse si las rocas se formaron cuando aún quedaba samario 146 en la Tierra. O'Neil, Carlson y sus colaboradores compararon las proporciones para determinar el momento de su formación. El resultado sorprendió a todos: 4280 millones de años. Para su asombro, habían descubierto las rocas más antiguas de nuestro planeta.

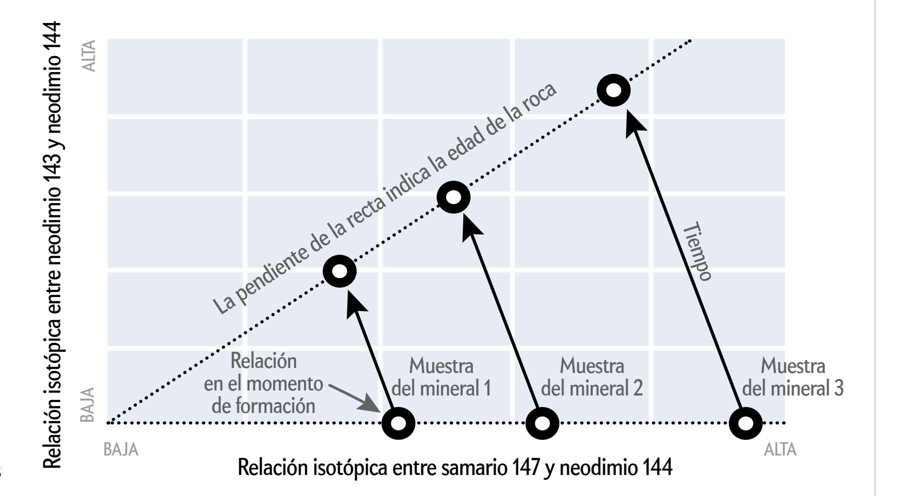
«Para nada esperábamos encontrar algo así», reconoce O'Neil. Él y sus colaboradores dieron a conocer el hallazgo en 2008. Desde entonces, y tras analizar un mayor número de muestras, han llegado a la conclusión de que las rocas de Nuvvuagittuq datan de hace 4400 millones de años.

Cómo datar una roca

El estudio de las especies atómicas presentes en una roca puede revelar su edad. Al solidificarse a partir de un magma, las rocas incorporan en su estructura isótopos radiactivos. A lo largo de millones de años, unos isótopos se transmutan en otros a un ritmo estable y muy característico. En el ejemplo reproducido aquí, el samario 147 (el isótopo «padre») se desintegra en neodimio 143 (el «hijo»). A medida que el tiempo transcurre, el número de átomos progenitores disminuye y el de los descendientes aumenta.

En la roca también quedan atrapados algunos átomos estables relacionados con la especie hija, como el neodimio 144. Estos no se desintegran, por lo que su abundancia se mantiene constante en el tiempo. Al representar gráficamente las relaciones isotópicas de átomos hijo y estables frente a las relaciones isotópicas de átomos padre y estables, se obtiene una recta (*gráfica*) cuya pendiente indica la edad de la roca: cuanto mayor sea, más átomos se han desintegrado y más antigua es la muestra.

El método de datación por carbono 14, tan empleado por los arqueólogos, se basa en un principio similar. Sin embargo, debido a la corta vida de ese isótopo, la técnica solo permite remontarse unos 60.000 años atrás.



¿LAS MÁS ANTIGUAS?

O'Neil y sus colaboradores presentaron sus resultados en un congreso celebrado en Vancouver. Mojzsis todavía recuerda la conmoción que le causó la noticia: «Me quedé con la boca abierta. Miré a mi alrededor y los asistentes estaban estupefactos. Pensé que había algo extraño».

Mojzsis contaba con buenas razones para sorprenderse. Él era uno de los pocos geólogos que habían viajado hasta Nuvvuagittuq para extender las investigaciones de Nadeau. Mojzsis y su equipo habían localizado un filón de rocas ígneas inyectado en la corteza tras la formación de esta. Las muestras contenían circones. De regreso a Colorado, determinaron que la edad de los circones ascendía a unos 3750 millones de años, un dato que cuadraba con los 3800 millones de años calculados originalmente por Nadeau. Sin embargo, en aquel momento O'Neil estaba afirmando ante Mojzsis y el resto de la comunidad científica que las rocas de Nuvvuagittuq eran 500 millones de años más viejas.

Bernard Bourdon, de la Escuela Normal Superior de Lyon y colaborador de Mojzsis, solicitó algunas de las muestras de O'Neil para someterlas a estudio. Los análisis de neodimio eran correctos. Sin embargo, a Mojzsis seguía pareciéndole que aquello carecía de sentido.

En 2011, Mojzsis regresó con sus estudiantes a Nuvvuagittuq, donde cartografiaron el terreno y los estratos rocosos que rodeaban las muestras datadas por O'Neil. Entre las rocas cuya edad se había estimado en 4400 millones de años, distinguieron bandas de cuarcita de color verde brillante. Mojzsis pensó que aquel hallazgo ofrecía una posibilidad de comprobar si las rocas de Nuvvuagittuq eran o no las más antiguas del planeta.

Los geólogos han observado estructuras similares en formaciones mucho más recientes. Se originan cuando los volcanes submarinos derraman roca fundida sobre el fondo oceánico. En ocasiones, la actividad volcánica cesa y los sedimentos procedentes de los continentes se depositan sobre las rocas ígneas. A continuación, los volcanes se reactivan y tapizan la roca sedimentaria con una nueva capa de material ígneo.

Si tal era el caso de Nuvvuagittuq, la cuarcita derivaría de sedimentos procedentes de las antiguas masas continentales, los cuales se habrían depositado durante una de aquellas pausas volcánicas. Y si la cuarcita contenía circones, estos debían ser más antiguos que la roca volcánica circundante, ya que su historia es mucho más larga.

«Estuvimos reptando con manos y pies por un gran número de afloramientos», recuerda Mojzsis. Tras varios días de búsqueda, localizaron dos áreas de cuarcita con circones, una de las cuales contenía millares de los minúsculos minerales. Al regresar con ellos a Colorado, Mojzsis calculó su edad. Según sus resultados, esta se situaba en 3800 millones de años: justo lo que *no* cabría esperar en rocas de hace 4400 millones de años. El grupo también abordó el problema de la edad de Nuvvuagittuq con otros métodos, como la datación a partir de la desintegración del lutecio en hafnio. Una vez más, el resultado fue de 3800 millones de años.

Aquellos indicios pusieron a Mojzsis sobre la pista de una nueva interpretación de lo ocurrido en Nuvvuagittuq. Hace 4400 millones de años, un volumen de roca fundida ascendió hacia la superficie terrestre, se solidificó y, al cristalizar, capturó samario 146. Aunque de vida corta, este isótopo aún estaba presente en la Tierra en aquella época temprana. Más adelante, la corteza primitiva se hundió de nuevo en el manto. El material se calentó hasta fundirse, pero no se mezcló por completo con el manto circundante. Una pequeña fracción permaneció aislada, en forma de una masa de magma con su propia concentración de neodimio. Por último, 600 millones de años después, la actividad volcánica expulsó el material de nuevo a la superficie. En el proceso se formaron algunas rocas que incorporaron parte

FUENTE: JONATHAN O'NEIL

de la antigua masa de magma y, con ella, su huella de 4400 millones de años.

«Ese material fundido puede conservar la memoria de una existencia previa», explica Mojzsis. Eso explicaría por qué una roca de 3800 millones de años aparentaba tener 4400 millones de años.

EL MISTERIOSO ORIGEN DE LOS CIRCONES

Mojzsis y sus colaboradores han presentado sus conclusiones en varios congresos; a veces, en las mismas sesiones en las que O'Neil defendía que las rocas se habían formado hace 4400 millones de años. El equipo de O'Neil ha regresado a Nuvvuagittuq para ampliar su colección de rocas de diez a unos cincuenta ejemplares. Ningún dato nuevo contradice la estimación original de la edad del afloramiento. O'Neil tampoco acepta las pruebas en las que se basan Mojzsis y los suyos para argumentar que Nuvvuagittuq solo tiene 3800 millones de años. «Tenemos visiones muy diferentes sobre la geología de la región», señala O'Neil.

Consideremos la capa de cuarcita en la que Mojzsis encontró los circones. En formaciones tan antiguas como las de Nuvvuagittuq, no resulta fácil identificar qué rocas las componen, pues a lo largo de millones de años han sufrido sucesivas deformaciones. De hecho, O'Neil no cree que se trate de bandas de cuarcita, sino de un filón de magma que se inyectó en la roca hace 3800 millones de años. En consecuencia, la edad de sus circones no guardaría relación con la edad de la roca circundante. «No hay nada extraño o inusual en esas rocas», explica O'Neil. «Son muy antiguas, eso es todo.»

Heaman, también experto en rocas antiguas, considera válidos los argumentos de O'Neil y su grupo: «Creo que sus pruebas resultan convincentes y que han actuado con la debida diligencia», opina. No obstante, Heaman piensa que la incertidumbre continuará hasta que alguien encuentre otra manera de datar las rocas. Puede que algunos minerales de las polémicas piedras de Nuvvuagittuq contengan uranio y plomo, una combinación que proporciona un método muy fiable para determinar la edad de una muestra por cuanto los científicos poseen una amplia experiencia al respecto. «Si alguien lograse dar con el material adecuado y obtener una edad tan antigua, la comunidad se mostraría más proclive a aceptar la idea de que lo que aflora en la zona es corteza primitiva», apunta Heaman.

EL ORIGEN DE LA VIDA

Si las rocas de Nuvvuagittuq realmente se formaron hace 4400 millones de años, O'Neil cree que permitirían investigar una de las épocas más antiguas de nuestro planeta, ya que habrían surgido poco después del Gran Impacto. También los circones australianos se originaron entonces; sin embargo, estos lo hicieron en el manto, a varios kilómetros de profundidad. O'Neil sostiene que las rocas de Nuvvuagittuq se engendraron en la superficie. «Su geoquímica resulta muy similar a la de un fondo oceánico», explica.

De ser cierto, ese hallazgo confirmaría que la Tierra adquirió un océano poco después del Gran Impacto. O'Neil aprecia notables similitudes entre la química de las rocas de Nuvvuagittuq y la de muestras del fondo marino mucho más recientes. Esa semejanza estaría indicando que los primeros océanos de la Tierra no eran demasiado diferentes de los actuales. El investigador cree también que las rocas muestran indicios de procesos tectónicos, lo que implicaría que estos habrían comenzado en etapas muy tempranas de la historia de nuestro planeta.

La posibilidad de que las rocas de Nuvvuagittuq se hayan formado hace 4400 millones de años en el fondo oceánico abre una perspectiva aún más emocionante: investigar el origen de la vida. Hoy por hoy, el registro fósil solo llega hasta 3500 millones de años de antigüedad. En rocas posteriores se han encontrado algunas bacterias, pero nunca en las más antiguas.

Sin embargo, los fósiles no constituyen la única huella que deja la vida a su paso. Dado que las bacterias consumen carbono, pueden alterar la proporción de isótopos de ese elemento presentes en el entorno y, con ello, las características de las rocas formadas en ese momento. Algunos investigadores sostienen que en las rocas de 3800 millones de años halladas en Groenlandia se aprecia ese desajuste en las abundancias de los isótopos de carbono. De ser el caso, ello constituiría un signo de vida.

Sin embargo, sigue sin haber huellas de vida que se remonten a los primeros 700 millones de años posteriores a la formación de la Tierra. Los científicos no pueden saber, por tanto, si la vida se originó de inmediato, nada más nacer el planeta, o si lo hizo varios cientos de millones de años después. También deben dilucidar dónde surgió. Algunos investigadores postulan que las moléculas biológicas aparecieron en desiertos o en charcos intermareales. Otros argumentan que los viveros primordiales se localizaron en fuentes hidrotermales profundas.

Las rocas de Nuvvuagittuq podrían proporcionar el material ideal para abordar tamañas cuestiones. De cara al futuro, O'Neil espera colaborar con otros investigadores para comprobar si las rocas pudieron haberse formado en fuentes hidrotermales. «No podemos pasar por alto esas rocas. Es el lugar idóneo donde pudo haberse originado la vida», afirma. Hallar los indicios más antiguos de vida constituye asimismo una de las obsesiones de Mojzsis. Pero él no viajará hasta Nuvvuagittuq para dar con ellos: «Pasaré el resto de mi carrera dedicado a ese sinsentido», comenta.

A pesar de todo, Mojzsis reconoce un aspecto positivo en la controversia con O'Neil: su disputa ha espoleado el desarrollo de mejores métodos de datación de rocas. «Se trata de un debate fascinante», reconoce Mojzsis. En el futuro, las generaciones de geólogos que viajen a lugares remotos y regresen con muestras misteriosas podrán beneficiarse de dichas técnicas y, con suerte, desentrañar los enigmas de la Tierra primordial. Y hay al menos algo en lo que O'Neil y Mojzsis sí están acuerdo: «Los pequeños enclaves de rocas primigenias se encuentran por todas partes. Simplemente, es muy fácil que pasen desapercibidos», explica O'Neil.

PARA SABER MÁS

The story of Earth. Robert Hazen. Viking, 2012.
Half a billion years of reworking of Hadean mafic crust to produce the Nuvvuagittuq Eoarchean felsic crust. Jonathan O'Neil et al. en *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 379, págs. 13-25, 2013.
Reduced, reused and recycled: Detrital circons define a maximum age for the Eoarchean (ca. 3750-3780 Ma) Nuvvuagittuq supracrustal belt, Quebec (Canada). Nicole L. Cates et al. en *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 362, págs. 283-293, 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

Una Tierra primigenia fría. John W. Valley en *IyC*, diciembre de 2005.
El origen violento de los continentes. Sarah Simpson en *IyC*, marzo de 2010.

Pat Shipman es profesora emérita de antropología en la Universidad estatal de Pensilvania.

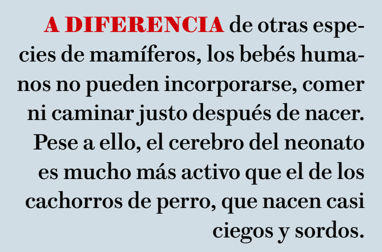


REPRODUCCIÓN HUMANA

El difícil trance del parto humano

La explicación al uso sobre los obstáculos que plantea el alumbramiento podría andar errada

Pat Shipman



A DIFERENCIA de otras especies de mamíferos, los bebés humanos no pueden incorporarse, comer ni caminar justo después de nacer. Pese a ello, el cerebro del neonato es mucho más activo que el de los cachorros de perro, que nacen casi ciegos y sordos.

EN SÍNTESIS

La gran cabeza del bebé humano se halla muy ajustada al espacio que ofrece el canal del parto, lo que dificulta el nacimiento.

Suele prevalecer la idea de que el tamaño cerebral del feto se ve limitado por los inconvenientes que las caderas anchas imponen a la locomoción materna.

Pero algunos estudios recientes han desmentido esta hipótesis y proponen que las dimensiones del cerebro se hallan restringidas por el gasto metabólico que supone para la madre engendrar un bebé grande.

MAURO FERMARIELLO, *SCIENCE SOURCE* (*bebé*);
OCEAN, *CORBIS* (*cachorros*)

El ser humano es un mamífero peculiar: camina sobre dos pies y posee un cerebro desmesurado. Engendra bebés grandes, dotados de un cerebro activo y muy desarrollado, pero provistos de un cuerpo penosamente endeble. Y pese a que desde un punto de vista evolutivo resulte desfavorable, una de cada mil madres da a luz a un bebé con una cabeza demasiado voluminosa para transitar por el canal del parto y precisa una cesárea.

Casi todas las mujeres sufren dolor durante el parto, el cual se prolonga mucho más que en otros mamíferos. Un estudio dirigido en 1999 por Leah Albers, de la Universidad de Nuevo México, analizó 2500 nacimientos a término y demostró que en las madres primerizas el parto se extendía una media de nueve horas. En contraste, el alumbramiento de los monos y los simios antropoides apenas dura un par de horas. Ello explica que la ayuda a la parturienta sea un fenómeno casi universal en todas las culturas. La evolución debería favorecer los partos sencillos y de bajo riesgo, pero no sucede así en los humanos. Para entender el porqué es preciso analizar las ventajas y los inconvenientes de los neonatos desarrollados, las caderas anchas de la madre y la carga metabólica que la gestación supone para la mujer.

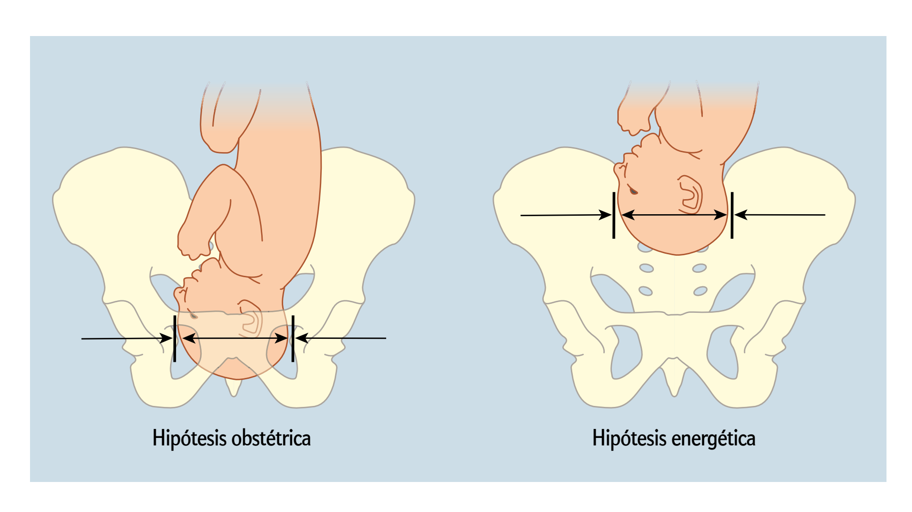
El neonato humano resulta singular entre los mamíferos porque, a diferencia de otras especies uníparas, no puede ponerse en pie, caminar y alimentarse nada más nacer, como lo haría un potrillo. En cambio, su cerebro es mucho más activo que el de los cachorros de perro, que nacen ciegos y sordos. Así pues, en comparación con otros animales uníparos, los bebés humanos nacen en un estadio de desarrollo más precoz, antes de que su cuerpo pueda caminar.

Existe la creencia arraigada de que esta extraña mezcla de dos estrategias adaptativas básicas —un cerebro despierto en un cuerpo incapaz— es fruto de una contradicción: el hecho de poseer un cerebro inusualmente grande y una locomoción bípeda. Esta explicación se denomina el dilema obstétrico. En la especie humana, el tamaño de la cabeza del feto a término está muy ajustado a la luz del canal del parto. Según la hipótesis obstétrica, la pelvis ancha permite engendrar bebés con cerebros voluminosos pero dificulta la marcha y la carrera, actividades para las que es mejor una cadera estrecha. La solución para conciliar estas necesidades antagónicas consiste en prolongar la gestación lo máximo posible para facilitar el desarrollo del cerebro en el útero y, después, antes de que la cabeza alcance un tamaño excesivo para atravesar el canal del parto, parir antes que otros mamíferos, en términos relativos.

Pero el trabajo de la reproducción no acaba ahí. A lo largo del primer año de vida, el cerebro y el cuerpo del lactante siguen creciendo con el mismo ritmo acelerado que en el útero, una estrategia arriesgada que exige una gran inversión de recursos por parte de la madre. Después de haberlo acogido en el vientre durante nueve meses, esta debe seguir cuidándolo y protegiéndolo otros doce. A lo largo de todo ese tiempo nutrirá al bebé con su leche, si dejamos a un lado la reciente invención de la leche artificial y otros sucedáneos. Y, antes de que se convierta en un adulto, tendrá que dispensar múltiples cuidados y alimentos a su retoño. Por supuesto, los padres contribuyen a la procreación y pueden facilitar de forma notable la tarea de la madre si aportan el sustento o la protegen.

Tal y como Robert Martin bromea en su nuevo libro, *How we do it* («Cómo lo hacemos»), el cerebro nos viene dado por nuestra madre, pese a la aportación genética del padre. La progenitora satisface las enormes necesidades metabólicas del bebé y hace posible que el cerebro adquiera un tamaño notable antes y después de nacer.

La dilatada lactancia constituye el período de mayor demanda energética en la vida de una mujer. La madre puede llegar a consumir parte de su cerebro, casi un 4 por ciento de su volumen, para satisfacer las necesidades energéticas del cerebro del bebé. (Por suerte, la fracción perdida se recupera en el plazo de seis meses.) Se ha especulado que el motivo del menor tamaño corporal de las hembras de los mamíferos, en comparación con el de los machos, se debe al enorme dispendio de energía que la gestación y la lactancia



LA HIPÓTESIS OBSTÉTRICA postula que el tamaño cerebral del neonato se ve limitado por los inconvenientes que las caderas anchas imponen a la locomoción materna. La hipótesis energética de la gestación y el crecimiento afirma que tal tamaño está limitado por el gasto metabólico que supone para la madre engendrar un bebé grande.

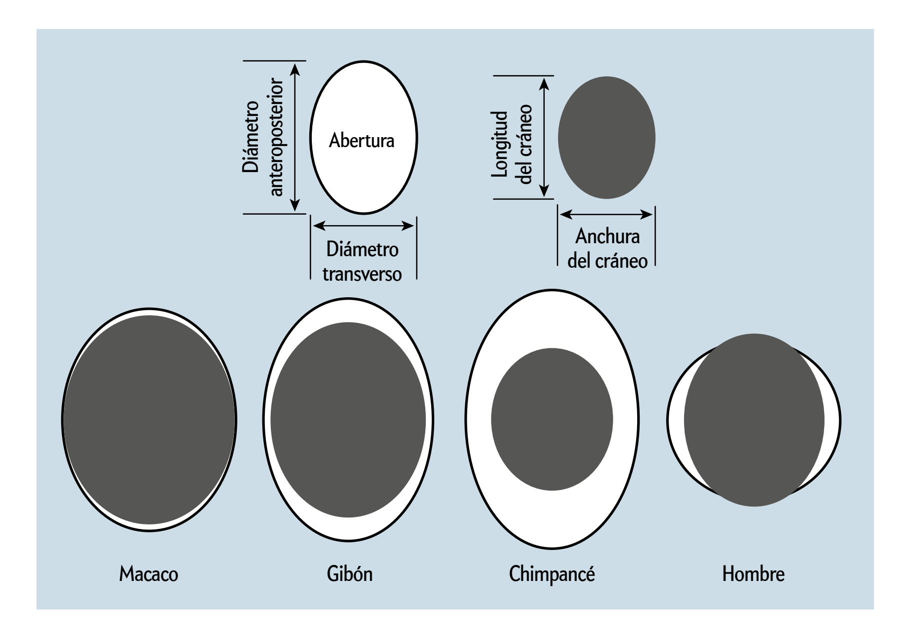
SIGMA XI, *AMERICAN SCIENTIST*

suponen para ellas; de tal modo, que las necesidades energéticas de ambos sexos a lo largo de la vida quedarían igualadas.

UN PARADIGMA EN ENTREDICHO

La hipótesis obstétrica postula que los requisitos del inusual sistema locomotor humano aumentan el riesgo y el coste de la reproducción. De ser cierto, la evolución favorecería el nacimiento en etapas más tempranas del desarrollo que en los otros primates cuadrúpedos, y las madres con caderas más anchas serían menos eficientes desde el punto de vista motriz.

La idea resulta ingeniosa y fácil de entender, lo que explica su amplia aceptación, pero nuevos datos arrojan sombras de duda sobre ella. Un reciente artículo firmado por Holly Dunsworth, de la Universidad de Rhode Island, y otros colaboradores reexamina las predicciones y las pruebas que sustentan la hipótesis obstétrica y plantea una explicación alternativa. Suele afirmarse que la gestación humana es breve en comparación con la de otros primates, si se considera que el cerebro del neonato debe crecer mucho más para alcanzar el tamaño del adulto. A primera vista, esa brevedad apoyaría una de las predicciones de la hipótesis obstétrica, esto es, que el nacimiento de los homínidos tiende a adelantarse para que la cabeza del bebé pueda atravesar el canal del parto. Pero en realidad la gestación humana se prolonga más, en términos absolutos (de 38 a 40 semanas), que la del chimpancé, el gorila y el orangután (32 semanas en el primero, y 37 o 38 semanas en los dos últimos). Cuando Dunsworth y sus colaboradores tuvieron en cuenta el tamaño del cuerpo materno, que en los primates exhibe una correlación positiva con la duración de la gestación, comprobaron que el embarazo humano dura más, en términos relativos, que el de los grandes simios. No es de extrañar que el tercer trimestre se haga tan largo para las futuras madres.



EN RELACIÓN CON OTROS PRIMATES, la cabeza del bebé se ajusta muy estrechamente al canal del parto. A efectos comparativos, la escala real se ha modificado para que el diámetro transverso del canal del parto sea el mismo en todos los casos.

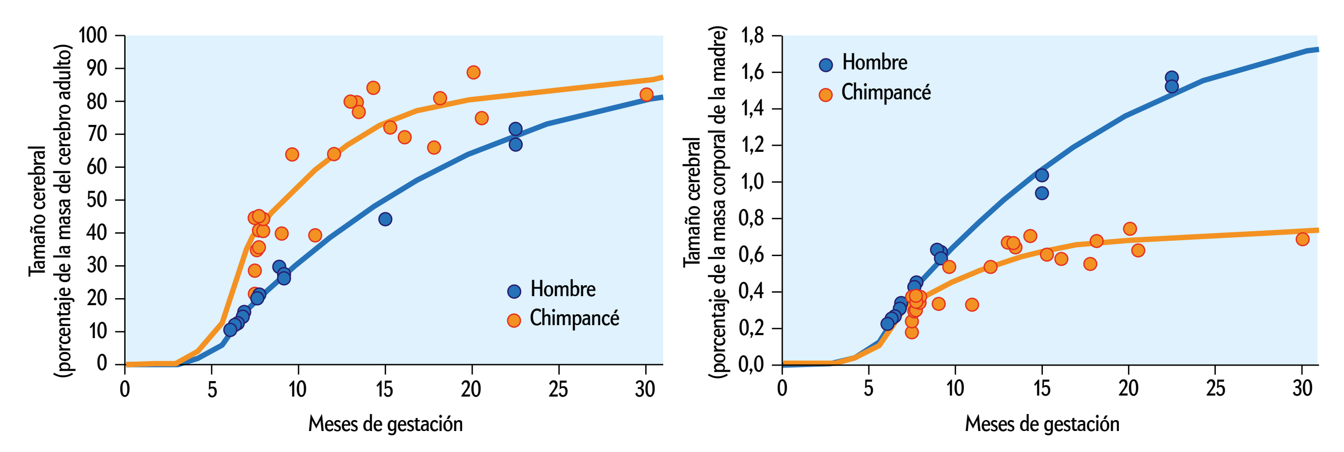
ADAPTADO DE K. ROSENBERG Y W. TREVATHAN EN *BJOG: AN INTERNATIONAL JOURNAL OF OBSTETRICS AND GYNAECOLOGY*, VOL. 109, PÁG. 1199, 2002

El conflicto evolutivo que convierte el parto humano en un trance difícil podría no estribar en la disyuntiva entre andar o correr y tener bebés, sino entre las necesidades metabólicas del feto y la capacidad de la madre para cubrirlas

Otro argumento muy esgrimido en defensa de la hipótesis obstétrica plantea que el cerebro del recién nacido es el menos desarrollado de todos los primates. Representa solo el 30 por ciento del órgano adulto, frente al 40 por ciento en los chimpancés. Esta diferencia en el tamaño inicial del cerebro induce a pensar que los bebés nacen menos desarrollados que los demás primates.

El quid de la cuestión estriba en que el tamaño del cerebro humano adulto supera por mucho el de los otros primates por motivos totalmente ajenos al nacimiento. Por esta razón, el empleo de este parámetro como base para comparar la duración de la gestación o el tamaño cerebral del recién nacido con respecto a otros primates subestima el desarrollo humano. Pero según apunta Peter Ellison (colaborador de Dunsworth en la Universidad Harvard) en su libro *Fertile ground* (2001), la pregunta pertinente es: dado el tamaño corporal materno, ¿qué tamaño cerebral puede permitirse su hijo? Se trata de un tema de oferta y demanda. El parto sobreviene cuando la madre ya no puede seguir cubriendo las necesidades nutricionales y metabólicas del bebé.

Ellison expone que el nacimiento tiene lugar cuando el feto comienza a «desfallecer de hambre». Desde esta perspectiva, el cerebro de un recién nacido no es pequeño para ser un primate, sino todo lo contrario. Los neonatos humanos presentan también un tamaño corporal grande respecto al de otros primates, si se tienen en cuenta las dimensiones del cuerpo materno. Ambos hechos apuntan a que la gestación puede llevar al límite el metabolismo de la madre. La hipótesis obstétrica, en cambio, sugiere que el factor limitante del tamaño al nacer es la locomoción, no el metabolismo. Plantea el concepto fundamental de que las mujeres de caderas anchas (que pueden dar a luz a neonatos más grandes) verán perjudicada la locomoción. Pero estudios minuciosos sobre el coste energético de la marcha y la carrera, entre ellos un nuevo trabajo de dos colaboradores de Dunsworth (Anna G. Warrener, de la Universidad Harvard, y Herman Pontzer, del Colegio Hunter), no respaldan tal idea. Hombres y mujeres apenas muestran diferencias en el coste y en la eficiencia de la locomoción, sin que la anchura de la cadera parezca influir. El canal del parto solo debería ampliarse tres centímetros en su parte más estrecha para facilitar el paso de un bebé cuyo cerebro representase el 40 por ciento del tamaño adulto, como sucede en los chimpancés.



DESDE LA PERSPECTIVA DEL LACTANTE, los humanos nacen con un cerebro menos desarrollado que los chimpancés, lo que sustenta la hipótesis obstétrica (*izquierda*). Desde el punto de vista de la madre, los humanos nacen con cerebros más voluminosos que los chimpancés, lo que respalda la hipótesis energética (*derecha*). Algunos investigadores sostienen que el cerebro adulto humano es mucho mayor que el de los demás primates por motivos ajenos al nacimiento; de ahí que emplear el tamaño del cerebro adulto como baremo para comparar la duración de la gestación o la talla del cerebro del neonato entre los primates subestimaría el desarrollo humano.

GRÁFICAS ADAPTADAS DE H. DUNSWORTH, ET AL. EN *PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE U.S.A.*, VOL. 109, PÁG. 15.212, 2012

Tal incremento no entorpecería notablemente la locomoción, puesto que muchas mujeres ya poseen caderas anchas. El conflicto entre los bebés con cerebros voluminosos y el bipedismo podría ser más teórico que real.

¿QUÉ CUESTA FORMAR UN BEBÉ?

La demostración de que los bebés no son más precoces que otros primates reviste interés, pero no ha permitido identificar los factores que limitan su tamaño cerebral. Dunsworth y sus colaboradores proponen que las restricciones metabólicas que debe soportar la madre condicionan la duración del embarazo y el crecimiento del feto. Han bautizado esta idea como «hipótesis energética de la gestación y el crecimiento».

A medida que el cerebro y el cuerpo crecen, la demanda energética del feto aumenta de forma exponencial. Llega un momento en que la madre ya no puede colmar las necesidades del feto y se desencadena el parto. El recién nacido sigue dependiendo de la madre, que, solícita, lo alimenta y lo cuida mientras su cerebro se desarrolla al mismo ritmo que antes de nacer. En el útero, el feto forma parte de la madre, pero al nacer el bebé se sitúa en un nivel trófico por encima de ella; se alimenta de ella como un parásito y le impone una mayor demanda metabólica. No obstante, las necesidades del bebé cambian y este asimila más ácidos grasos de cadena larga, esenciales para el crecimiento cerebral. Como la leche materna representa un vehículo mucho mejor para él que la placenta, el nacimiento no supone problema alguno.

La hipótesis obstétrica no ha quedado caduca; tan solo se halla en entredicho. Pero convencer a los que han crecido intelectualmente con ese paradigma de que reconsideren otra hipótesis puede resultar difícil. Cuando Dunsworth imparte una charla sobre la hipótesis energética, resume una conversación que ejemplifica ese desafío:

«A menudo me preguntan: "¿Por qué entonces la pelvis no se ensancha para facilitar el parto?" A lo que siempre contesto: "Porque ya posee suficiente amplitud. Lo demuestran los 7000 millones de personas que pueblan el planeta". Pero tal respuesta no convence a la mayoría de los que la plantean. Y cuando aducen que el estrecho margen de espacio al nacer es demasiada casualidad para pasarlo por alto, yo les pregunto: "¿No es solo mera coincidencia que mi dedo encaje perfectamente en el agujero de mi nariz?"»

Dunsworth tiene razón. La adaptación evolutiva no tiene por qué ser perfecta, solo suficiente. Tal vez la pelvis femenina se haya adaptado al tamaño cerebral del feto, en lugar de haberlo limitado. Aun así, no contamos con ninguna razón clara que explique por qué el bebé encaja tan justo en el canal del parto. El tamaño de la pelvis podría verse limitado por un factor que no se ha tenido en cuenta todavía en los estudios de locomoción, como la velocidad, el equilibrio o el riesgo de lesiones. O, tal vez, una simple cuestión de economía determina ese estrecho margen de espacio entre la pelvis y el cerebro del recién nacido. Una tercera posibilidad es que el nacimiento humano no siempre haya entrañado dificultad; solo se habría convertido en un problema a raíz del aumento de la talla del neonato, propiciado por la mejora en la alimentación. La hipótesis obstétrica y la energética no son mutuamente excluyentes.

El conflicto evolutivo que convierte el parto humano en un trance difícil podría no estribar en la disyuntiva entre andar o correr y parir, sino entre las necesidades metabólicas del feto y la capacidad de la madre para cubrirlas. Quizás el problema no solo sea dar a luz a un bebé con un cerebro de gran tamaño. Tal vez la auténtica dificultad consista en engendrarlo.

PARA SABER MÁS

The duration of labor in healthy women. L. L. Albers en *Journal of Perinatology*, vol. 23, págs. 465-475, 1999.

On fertile ground: A natural history of human reproduction. P. Ellison. Harvard University Press, Cambridge, 2001.

Metabolic hypothesis for human altriciality. H. M. Dunsworth et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the U.S.A.*, vol. 109, págs. 15.212-15.216, 2012.

How we do it: The evolution and future of human reproduction. R. D. Martin. Basic Books, Nueva York, 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

La evolución del parto humano. K. R. Rosenberg y W. R. Trevathan en *IyC*, enero de 2002.

por Saleem H. Ali

Saleem H. Ali es director del Centro para la Responsabilidad Social en Minería de la Universidad de Queensland en Australia y director fundador del Instituto para la Diplomacia Ambiental y Seguridad de la Universidad de Vermont.



Materiales críticos

El acceso a una energía limpia y asequible depende de sustancias poco conocidas

La era del silicio entraña un problema: sus poderes dependen de elementos mucho más escasos que la arena de playa. Algunos se hallan, sencillamente, en cantidad limitada; muchos de nosotros ni siquiera hemos oído hablar de ellos. Aun así, se han convertido en factores clave en materia de economía ecológica. Elementos de nombres tan extravagantes como itrio, neodimio, europio, terbio y disprosio constituyen componentes esenciales en la iluminación de bajo consumo, los imanes permanentes de alta potencia y otras técnicas. Y el galio, el indio y el telurio forman las finas películas fotovoltaicas de los paneles solares. El Departamento de Energía estadounidense (DOE) considera los cinco primeros elementos «materiales críticos», indispensables para los avances técnicos pero cuyo suministro corre peligro. Los expertos de este organismo siguen de cerca la producción mundial de los tres últimos elementos y de litio, que proporciona baterías para linternas de bolsillo y coches híbridos.

El año pasado, el DOE dio un paso fundamental al inaugurar el Instituto de Materiales Críticos, un programa de 120 millones de dólares diseñado para evitar una posible falta de abastecimiento. Dirigido por el Laboratorio Ames de Iowa y respaldado por otros 17 laboratorios nacionales, universidades y empresas, el Instituto ha recibido muy buena acogida. Lamentablemente —lo mismo que el Proyecto Manhattan—, el motor del programa guarda mayor relación con la amenaza de un conflicto internacional que con la colaboración científica. Casi sin duda, la consignación presupuestaria fue aprobada en el Congreso por miedo al dominio de China sobre un gran número de elementos críticos y a la ambición de Bolivia de convertirse en la «Arabia Saudita del litio».

Las preocupaciones son casi inevitables. China —históricamente un espinoso aliado de EE.UU., en el mejor de los casos— tiene a su disposición gran parte del mercado mundial de materiales críticos. Sobre todo los que corresponden a tierras raras. A pesar de lo que sugiere su apelativo, estos elementos son varias veces más abundantes que el oro o el platino y se hallan en yacimientos repartidos por todo el planeta. Sin embargo, una mano de obra barata y unas normativas ambientales laxas han permitido a China monopolizar el mercado mundial, la explotación y el refinado de más del 90 por ciento de tierras raras.

Al propio tiempo, China ha incumplido reiteradamente sus cuotas de producción. Con la sospecha de que manipulaba el mercado, EE.UU., la Unión Europea y Japón presentaron una denuncia formal ante la Organización Mundial del Comercio en 2012. China argumenta que los recortes en la producción eran necesarios



ROSS MACDONALD

por cuestiones de limpieza ambiental. En el momento de publicarse este artículo se estará recurriendo probablemente una sentencia preliminar dictada contra China en octubre de 2013. Mientras, Japón ha anunciado el descubrimiento de enormes yacimientos de tierras raras, y EE.UU., entre otras naciones, se esfuerza por volver a poner en marcha su infraestructura en desuso. Las restricciones no perdurarán.

El litio de Bolivia es otra historia. El empobrecido país, sin salida al mar, no necesita echar mano de una escasez artificial para incentivar el mercado. Al tratarse del metal más ligero, el litio presenta una capacidad excepcional para formar compuestos que pueden almacenar electricidad en un peso y volumen mínimos. Al menos la mitad de las reservas mundiales conocidas se hallan en una región relativamente pequeña de los Andes, donde Bolivia y Argentina comparten frontera con Chile.

Pero hay mucho más en juego que novedosos aparatos para los ricos. El valor de los materiales críticos reside en un uso más eficiente de la energía. La quinta parte de la población mundial vive todavía sin acceso a una electricidad limpia y económica, un problema que podría remediar con el tiempo un suministro sin obstáculos de tierras raras y litio. Lo difícil será evitar que antiguos conflictos internacionales pongan trabas a tal objetivo. EE.UU. podría colaborar sumándose al espíritu del desarrollo y la cooperación internacional. Su Fundación Nacional de Ciencia, que ya cuenta con una oficina en Pekín, podría facilitar un primer paso. Pero harían falta más iniciativas similares para promover la colaboración científica en el ámbito de las tierras raras. Asimismo, las tensiones entre Washington y La Paz podrían sacar provecho de las muestras de disposición sincera de Estados Unidos para ayudar a Bolivia a explotar el salar de Uyuni, donde una procesadora piloto comenzó sus operaciones a comienzos de 2013.

Gestos sencillos como los anteriores podrían encauzar el diálogo internacional hacia un acuerdo sobre la seguridad del suministro de minerales a escala global. De alguna manera ya se ha comenzado mediante iniciativas como el convenio de Minamata sobre el mercurio, el pacto internacional adoptado en fecha reciente para reducir las emisiones y el empleo del metal tóxico. La salud y la prosperidad de la humanidad dependen del aprovechamiento inteligente de los recursos naturales. Unos intereses nacionales cortos de miras y las rivalidades solo pueden obstruir dicho proceso dejándonos, en definitiva, igual de pobres. La necesidad de materiales críticos debería catalizar la cooperación internacional. Al fin y al cabo, pueden iluminar el mundo —literalmente.

por Javier Alba-Tercedor

Microtomografías de invertebrados

Un nuevo método permite examinar con detalle las estructuras internas de los animales sin necesidad de destruirlos

La tomografía de rayos X es una técnica no invasiva muy conocida por su amplio uso en medicina. En los últimos años se han desarrollado instrumentos micro y nanotomográficos de gran precisión (con resoluciones de 1 y 0,1 micras por píxel, respectivamente) que ofrecen reconstrucciones muy detalladas. Al no alterar en modo alguno las muestras, permiten analizar ejemplares valiosos sin ocasionarles ningún daño.

La microtomografía produce reconstrucciones volumétricas muy similares a las elaboradas mediante microscopía electrónica de barrido, pero ofrece ventajas añadidas: una vez escaneados, los ejemplares pueden examinarse en el ordenador desde cualquier ángulo. También se les puede practicar cortes virtuales, similares a los aplicados en estudios clásicos con micrótomos, pero sin necesidad de destruirlos. Mediante ciertos programas informáticos se resaltan las estructuras con diferentes colores, en función de su mayor o menor opacidad frente a los rayos X. De este modo, es posible emprender auténticos viajes hacia el interior de los organismos y examinar su anatomía de un modo jamás imaginado hasta ahora.

Estas técnicas están revolucionando el conocimiento que teníamos de muchos invertebrados, no solo desde el punto de vista anatómico sino también funcional [*véase* «El refinado oído del saltamontes», por Fernando Montealegre-Z, *en este mismo número*]. Su empleo en nuestro laboratorio ha permitido dilucidar el papel de las espículas que presentan algunas especies de nudibranquios (pequeñas babosas marinas), o por qué algunos coleópteros pueden volar durante las horas de más calor (gracias a unas estructuras internas que lo disipan), mientras que otras especies emparentadas solo pueden hacerlo en horas crepusculares y nocturnas, cuando descienden las temperaturas.

Otro campo en el que están demostrando utilidad es en la docencia. En la Universidad de Granada estamos utilizando imágenes y vídeos obtenidos mediante microtomografía para la enseñanza de la zoología (www.youtube.com/albatercedor). Hace poco han aparecido aplicaciones para dispositivos móviles (como CTVox) que permiten al alumnado descargarse modelos de animales y estudiarlos. Ello constituye una magnífica alternativa para evitar la disección de animales, una práctica que fue muy habitual en las sesiones prácticas de laboratorio.

—Javier Alba-Tercedor
Dpto. de zoología, Facultad de ciencias
Universidad de Granada

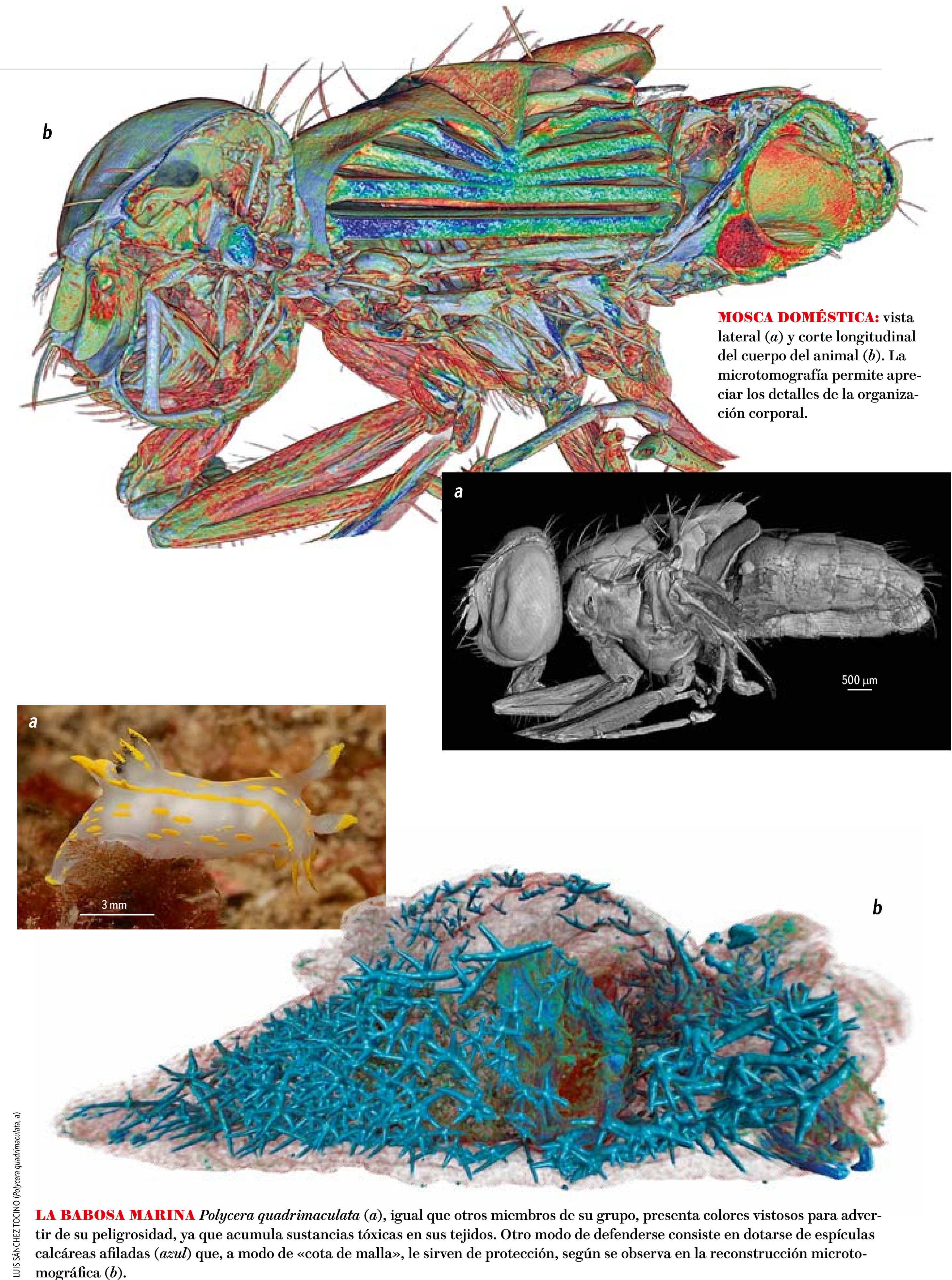
HEMBRA de un coleóptero acuático del género *Dryops*, un habitante frecuente de los cursos de agua. Se muestra una vista lateral (*a*) y un corte dorsoventral (*b*), en el que se observan las diferentes estructuras internas en distintos colores.

b

a

250 μm

ILUSTRACIONES CORTESÍA DEL AUTOR



MOSCA DOMÉSTICA: vista lateral (*a*) y corte longitudinal del cuerpo del animal (*b*). La microtomografía permite apreciar los detalles de la organización corporal.

LA BABOSA MARINA *Polycera quadrimaculata* (*a*), igual que otros miembros de su grupo, presenta colores vistosos para advertir de su peligrosidad, ya que acumula sustancias tóxicas en sus tejidos. Otro modo de defenderse consiste en dotarse de espículas calcáreas afiladas (*azul*) que, a modo de «cota de malla», le sirven de protección, según se observa en la reconstrucción microtomográfica (*b*).

LUIS SÁNCHEZ TOCINO (*Polycera quadrimaculata, a*)

por Javier Echeverría Ezponda

Javier Echeverría, ex director del Instituto de Filosofía del CSIC y Premio Nacional de Ensayo 2000, es en la actualidad profesor de investigación en Ikerbasque (Fundación Vasca para la Ciencia).



Los valores de las ciencias

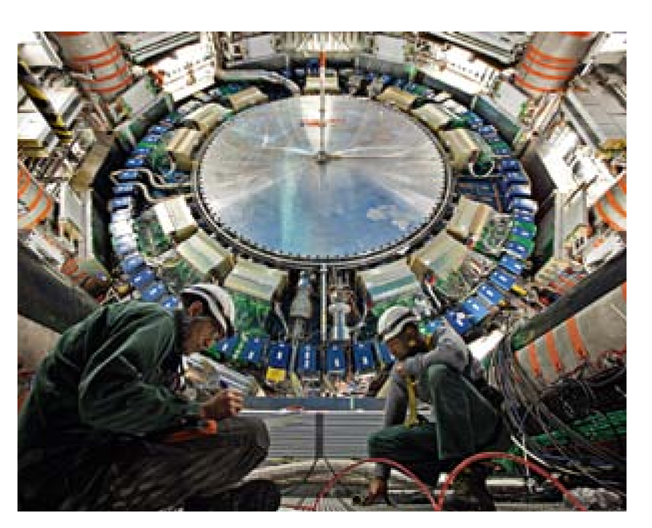
Del ideal de neutralidad del siglo xix a la supremacía actual de la innovación

¿Qué papel desempeñan los valores en el desarrollo de la ciencia? A finales del siglo xix y principios del xx, la tradición positivista afirmaba que ninguno. Como mostró Robert N. Proctor en *Value-free science*? (1991), la idea de una ciencia neutra, sin valores, se remonta a la creación de la Real Sociedad londinense y al *Royalist Compromise*, acuerdo entre dicha institución científica y la monarquía británica según el cual los científicos tendrían libertad de investigación siempre y cuando no se involucrasen en cuestiones religiosas, políticas o morales.

En su *Catecismo positivista*, Auguste Comte afirmó que la ciencia tiene que ver con los hechos, no con los valores. Poincaré, Einstein y otros muchos científicos aceptaron plenamente ese postulado, que ha sido dominante en las comunidades científicas físico-naturales. El filósofo Max Weber lo trasladó a las ciencias sociales, al afirmar la *Wertfreiheit* («libertad de valores»). Según él, también los economistas y los sociólogos deben adoptar una postura neutral cuando investigan. La ciencia ha de buscar la objetividad y por eso ha de describir, comprender y explicar los hechos, pero sin emitir juicios de valor. En la tradición empirista y positivista, esos juicios son subjetivos, por eso caen fuera del discurso científico. En su *Tractatus logico-philosophicus* (1921), Wittgenstein mantuvo tesis más radicales: «En el mundo todo es como es y sucede como sucede, en él no hay ningún valor, y aunque lo hubiese no tendría ningún valor». Los valores no existen en el mundo objetivo, los aportan los sujetos, sean individuales o colectivos.

Esa dicotomía entre hechos y valores se derrumbó a lo largo del siglo xx, como el filósofo Hilary Putnam presentaba en su obra *El colapso de la dicotomía hechos/valores* (2002). Hay dos causas principales de este giro. Por un lado, la noción de valor ha ampliado su significado. Por otro, la propia ciencia se ha transformado radicalmente, sobre todo a partir de la Segunda Guerra Mundial. Hoy en día hay que distinguir entre ciencias y tecnociencias. En el caso de estas últimas, los problemas axiológicos (relacionados con los valores) son frecuentes, hasta el punto de que han dado origen a una nueva disciplina: la ética de la ciencia.

Robert Merton, fundador de la sociología de la ciencia, fue uno de los primeros en cuestionar la oposición entre hechos y valores. En 1942 afirmó que la ciencia posee un *ethos* basado en cuatro grandes principios: comunismo, universalismo, desinterés y escepticismo. John Ziman añadió en 2000 un quinto criterio: la originalidad. Los descubrimientos científicos originales deben intentar tener una validez universal, y los investigadores han de ser desinteresados a la hora de difundirlos, además de escépticos respecto a sus propias teorías. Es decir, no deben creer que son verdaderas, sino más bien hipótesis verosímiles que, tarde o temprano, serán refutadas o, cuando menos, mejoradas por otros, como afirmó el falsacionismo metodológico de Karl R. Popper. Pese a las críticas de Merton y Popper, la mayoría de los científicos siguieron aceptando el credo positivista de la neutralidad axiológica.



CERN

En *La estructura de las revoluciones científicas* (1962), Thomas Kuhn afirmó que los paradigmas científicos tienen siempre un componente axiológico. Llegó a decir incluso que algunos valores de la ciencia son permanentes, aunque el peso específico de unos u otros puede cambiar según la disciplina, la época y el propio investigador. En todo caso, una buena teoría científica debe satisfacer, según Kuhn, al menos estos cinco valores: precisión, coherencia, generalidad, simplicidad y fecundidad. Luego añadió la utilidad, pensando en lo que hoy se denomina investigación aplicada. En suma: los científicos cuentan con sus propios criterios de valoración para descartar hipótesis y teorías, así como para preferir unas a otras. De hecho, dedican buena parte de su tiempo a la evaluación. El rol de árbitro (*referee*) es casi tan importante como el de investigador, sobre todo ahora que tanto peso tiene el impacto de las publicaciones.

Larry Laudan, Hilary Putnam y otros autores propusieron la denominación de «valores epistémicos» para ese tipo de valores propios de la ciencia, puesto que permiten estimar positiva o negativamente el conocimiento. Desde los años noventa, la cuestión de los valores ha entrado en la agenda de filósofos, sociólogos e historiadores de la ciencia, e incluso numerosos investigadores han empezado a aceptar que, aparte de los valores epistémicos, la actividad científica está marcada por otros criterios: económicos,

políticos, jurídicos, sociales, ecológicos y, por supuesto, también morales y estéticos. La distinción entre valores internos y externos a la ciencia se usa hoy en día con naturalidad, sin recordar que hace un siglo era intempestiva.

La primera razón de ese cambio de modelo es clara: tradicionalmente, la esfera de los valores se circunscribía a la religión, la moral y la estética. Una «ciencia sin valores» implicaba, por tanto, prescindir de ese tipo de juicios. Sin embargo, cuando alguien evalúa un artículo o elabora un *ranking* de universidades también está emitiendo juicios de valor, por ejemplo, institucionales. La noción de valor se amplió considerablemente a lo largo del siglo xx.

La segunda razón del giro axiológico estriba en la radical transformación que la ciencia experimentó a partir de 1940, con la emergencia de los sistemas de I+D. La investigación mostró su valor estratégico-militar durante la Segunda Guerra Mundial con programas como el Manhattan, el ENIAC o el Laboratorio de Radiación [*véase* «¡Calla y calcula!», por David Kaiser en Investigación y Ciencia, abril de 2014]. Tras el informe de Vannevar Bush al presidente Roosevelt, *Science, the endless frontier* (1945), surgió la política científica con sus líneas prioritarias, grandes programas e infraestructuras de investigación (*big science*), convocatorias públicas competitivas, procesos de evaluación, métodos de gestión de equipamientos y recursos humanos, índices de impacto, etcétera. Todos esos cambios en la práctica científica conllevaron nuevos valores y nuevos objetivos.

Esa transformación ha recibido varias denominaciones: «modo 2 de conocimiento», «ciencia postnormal» y «ciencia postacadémica», entre otras muchas. Por mi parte, prefiero «tecnociencia», término que comenzó a ser utilizado en los años ochenta por diversos autores. Subraya el fuerte componente tecnológico que tiene en la actualidad la investigación científica, así como la cooperación necesaria entre científicos, ingenieros y técnicos. También apunta al crecimiento del volumen financiero, debido al coste de los grandes equipamientos y al tamaño de los equipos científicos (caso del CERN, *en la fotografía*). Estos problemas conllevan varios tipos de valoraciones, algunas externas a las propiamente científicas, pero en muchos casos decisivas para que un proyecto pueda iniciarse o no. Tampoco hay que olvidar las consecuencias ambientales perniciosas de ciertas investigaciones, las cuales requieren control, ni los problemas jurídicos, sociales, morales y religiosos que suscitó el Proyecto Genoma, o los actuales Proyecto Cerebro Humano y BRAIN, por poner ejemplos de tecnociencias emergentes. Valga también la nanotecnia como ejemplo, dadas sus poderosas componentes tecnológicas y empresariales. Y, por supuesto, la convergencia NBIC (nano-bio-info-cogno), que ha marcado la agenda tecnocientífica a principios del siglo xxi.

En la segunda mitad del siglo xx, buena parte de la ciencia se convirtió en tecnociencia

La ciencia cambió de forma notable en la segunda mitad del siglo xx; buena parte de ella se ha convertido en tecnociencia. Esta transformación ha acarreado nuevos problemas axiológicos, que no se limitan a cuestiones epistémicas, sino que atañen a valores económicos, jurídicos, empresariales, políticos, sociales, ambientales e incluso militares, sin olvidar los tres tipos de valores clásicos (religiosos, morales y estéticos). A las ciencias les conciernen, como mínimo, los epistémicos. A las tecnociencias, de varios tipos; sobre todo los específicamente tecnológicos: utilidad, eficiencia, eficacia y usabilidad, entre otros.

Por ambas razones, la *Wertfreiheit* de Weber se ha difuminado a principios del siglo xxi, tanto en las ciencias físico-naturales como en las sociales. Estas últimas también se han tecnologizado, razón por la cual cabe distinguir entre ciencias sociales y tecnociencias sociales. Obvio es decir que las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) han ejercido una gran influencia en esta transformación, sobre todo en las tres últimas décadas. Casi todos los científicos investigan hoy ante la pantalla de su ordenador, a través de la cual observan «el mundo», es decir, las simulaciones informáticas y las imágenes, fórmulas, datos y documentos digitalizados que forman parte de la actividad investigadora cotidiana. Parafraseando a Wittgenstein: el mundo (científico) del siglo xxi está compuesto de tecnohechos. La mayoría de las acciones científicas se realizan con ayuda de las TIC, por eso son tecnoacciones que generan tecnohechos. Al otro lado de la pantalla está «el mundo», sea este matemático, físico, biológico, químico, corporal, económico o social. Pero ante la pantalla, que es donde se observa, se lee, se mide y se escribe, aparecen representaciones tecnológicamente construidas de dichos mundos. Representaciones que han de ser evaluadas, al igual que las herramientas y las personas que las construyen.

No solo se evalúan los conocimientos. Las tecnociencias son más complejas que las ciencias e involucran a otros agentes sociales, no solo a los científicos. Hay quienes invierten dinero en la investigación, sean agentes privados o públicos. Quieren conocimiento, pero también otro tipo de resultados. Piden, por ejemplo, que la I+D genere patentes rentables y, en último término, innovaciones. La innovación es uno de los grandes valores de nuestra época e incide radicalmente en la investigación científica. La Agenda de Lisboa (2000) pretendió que la Unión Europea fuese el líder mundial entre las sociedades del conocimiento. Dicho objetivo no se logró debido a la «paradoja europea», que cabe sintetizar en cuatro palabras: mucho conocimiento, poca innovación. Desde el año 2010, la nueva estrategia europea (Unión por la innovación) cifra sus objetivos en ese valor transversal, la innovación, y ello hasta 2020 (Horizonte 2020). Dicho sucintamente: el conocimiento científico tiene valor epistémico, no hay duda, pero los inversores demandan conocimientos que generen innovaciones a corto, medio o largo plazo. La innovación es uno de los principales vectores axiológicos de la tecnociencia y, por ende, de la ciencia contemporánea, en la medida en que esta ha generado tecnociencias que son evaluadas conforme a sistemas de valores, epistémicos y no epistémicos, cada vez más complejos.

PARA SABER MÁS

Tractatus logico-philosophicus. Ludwig Wittgenstein. Alianza, 1973.

Value-free science? Robert N. Proctor. Harvard University Press, 1991.

The collapse of the fact/value dichotomy. Hilary Putnam. Harvard University Press, 2002.

Right, wrong and science. Evandro Agazzi. Rodopi, Amsterdam, 2004.

Evaluar las innovaciones y su difusión social. Javier Echeverría en *Isegoria*, vol. 48, págs. 173-184, 2013.

MATEMÁTICAS

NUNCA DIGAS NUNCA

Por qué no deberíamos asombrarnos ante supuestos milagros y otros sucesos extraordinarios: a menudo, la ley de los grandes números los hace casi inevitables

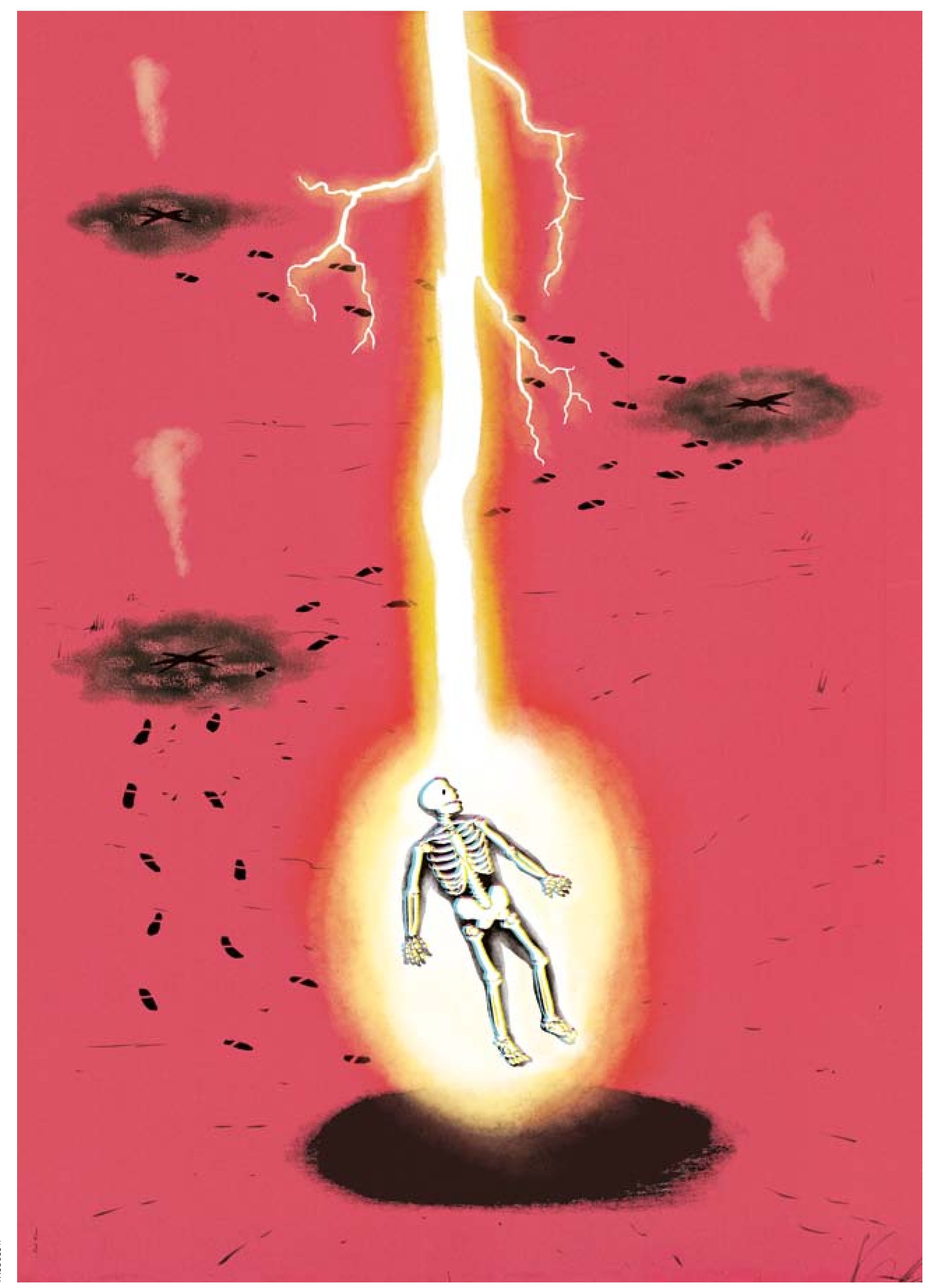
David J. Hand

Un conjunto de leyes matemáticas, que aquí denominaremos «principio de improbabilidad», nos dice que no tendríamos que sorprendernos tanto por ciertas coincidencias. Es más, deberíamos *esperar* que sucedan. Uno de los aspectos clave de dicho principio radica en la ley de los grandes números. Esta nos asegura que, si disponemos de un número suficiente de oportunidades, antes o después sobrevendrá cualquier suceso posible, con independencia de lo improbable que este resulte en cada ocasión individual. A veces, sin embargo, contamos con un vasto número de oportunidades, pero nos parece que hay relativamente pocas. Este mal juicio nos lleva a subestimar de manera muy burda la probabilidad de un suceso. Pensamos que algo es casi imposible cuando, en realidad, es muy probable que ocurra, tal vez casi seguro.

¿Cómo puede suceder que nos hallemos ante un gran número de oportunidades y no nos percatemos de ello? La combinatoria nos da la respuesta: en general, el número de interacciones posibles entre varios elementos aumenta exponencialmente con el número de estos. El conocido «problema del cumpleaños» nos brinda un buen ejemplo.

Considere lo siguiente: ¿cuántas personas deben reunirse en una sala para que resulte más probable que improbable que dos de ellas cumplan años el mismo día? La respuesta es 23: si hay 23 o más personas en la sala, lo más probable es que dos de ellas hayan nacido el mismo día del año.

Si es la primera vez que oye hablar del problema del cumpleaños, tal vez la respuesta le haya sorprendido. ¿No son 23 personas demasiado pocas? Quizás haya razonado del siguiente modo: solo hay una posibilidad entre 365 de que una per-



PAUL BLOW



David J. Hand es investigador y profesor emérito de matemáticas del Colegio Imperial de Londres. Ha presidido la Real Sociedad de Estadística del Reino Unido y es autor de *Statistics: A very short introduction* (Oxford University Press, 2008).

sona escogida al azar cumpla años el mismo día que yo. Por tanto, existe una probabilidad de 364/365 de que una persona dada celebre su cumpleaños en una fecha diferente. Si somos n personas en la sala, cada una de las $n - 1$ restantes tiene una probabilidad de 364/365 de cumplir años en un día distinto que yo. Por tanto, la probabilidad de que todas ellas hayan nacido en otra fecha asciende a $364/365 \times 364/365 \times 364/365 \ldots \times 364/365$, donde el producto comprende $n - 1$ factores.

Si n vale 23, el resultado es 0,94. Dado que ese número corresponde a la probabilidad de que nadie cumpla años el mismo día que nosotros, la probabilidad de que al menos alguien sí lo haga debe ser 1 – 0,94. (Ello se debe a que, o bien alguien cumple el mismo día que nosotros, o bien no lo hace nadie, por lo que las probabilidades de ambos sucesos han de sumar 1.) Esto nos da 1 – 0,94 = 0,06. Sin duda, un número muy pequeño.

Sin embargo, hemos efectuado el cálculo equivocado. No se nos preguntaba por la probabilidad de que alguien cumpla años el mismo día que nosotros, sino por la probabilidad de que dos personas *cualesquiera* hayan nacido el mismo día del año. Eso incluye la probabilidad de que el aniversario de alguien coincida con el nuestro (la cual viene dada por el número que acabamos de calcular), pero también la de que dos o más personas cualesquiera hayan nacido el mismo día del año, sea cual sea este.

Aquí hemos de tener en cuenta la combinatoria. Aunque solo existen $n - 1$ personas que podrían cumplir años el mismo día que nosotros, hay un total de $n\,(n - 1)/2$ posibles parejas en la sala. Ese número crece muy rápido a medida que n aumenta. Cuando n vale 23, asciende a 253: más de diez veces mayor. En otras palabras, si hay 23 personas en la sala, tenemos 253 posibles parejas, pero solo 22 de ellas nos incluyen.

Calculemos ahora lo que se nos había pedido: la probabilidad de que no haya dos personas en la sala que cumplan el mismo día. En el caso de dos individuos, la probabilidad de que el segundo no haya nacido el mismo día que el primero asciende a 364/365. Por tanto, la probabilidad de que cumplan años en días distintos y que un tercero lo haga en un día diferente es $364/365 \times 363/365$. Del mismo modo, la probabilidad de que esas tres personas celebren sus cumpleaños en días distintos y que una cuarta lo haga otro día es $364/365 \times 363/365 \times 362/365$. Iterando este razonamiento, vemos que la probabilidad de que 23 individuos cumplan años en días diferentes asciende a $364/365 \times 363/365 \times 362/365 \times 361/365 \ldots \times 343/365$.

Ese producto vale 0,49. Puesto que la probabilidad de que las 23 personas hayan nacido en días distintos asciende a 0,49, la probabilidad de que al menos dos cumplan años el mismo día vale 1 – 0,49 = 0,51: en efecto, superior a 1/2.

¿LOTERÍAS AMAÑADAS?

La lotería primitiva nos ofrece varios ejemplos de sucesos que a primera vista parecen casi imposibles. El 6 de septiembre de 2009, la lotería búlgara premió los números 4, 15, 23, 24, 35, 42. En ellos no hay nada sorprendente. Todos los dígitos que los componen toman valores bajos (1, 2, 3, 4 o 5), pero dicha circunstancia no es inusual. Vemos también que aparecen un par de números consecutivos, 23 y 24, pero se trata de algo que ocurre mucho más a menudo de lo que solemos pensar. (Si pide a alguien que enuncie seis números entre el 1 y el 49, comprobará que elige pares de números consecutivos con menos frecuencia que si las cantidades se hubiesen seleccionado realmente al azar.)

Lo sorprendente fue lo que ocurrió cuatro días después. El 10 de septiembre, los números premiados en la lotería primitiva búlgara fueron 4, 15, 23, 24, 35, 42: exactamente los mismos que la semana anterior. El acontecimiento causó una tormenta mediática. En un artículo de la agencia Reuters del 18 de septiembre, se citaban las siguientes declaraciones de una portavoz: «Es la primera vez que ocurre en los 52 años de historia de la lotería. Estamos absolutamente impresionados por semejante coincidencia estrafalaria, pero así ha sido». El entonces ministro búlgaro de deportes, Svilen Neikov, ordenó una investigación. ¿Podía haberse perpetrado un fraude?

Sin embargo, aquella coincidencia no fue más que otro ejemplo del principio de improbabilidad, en su forma de ley de los grandes números amplificada por la gran cantidad de las combinaciones posibles. En primer lugar, existen numerosas loterías primitivas en todo el mundo. Además, los sorteos se repiten una y otra vez, año tras año. Solo esto genera ya un vasto número de oportunidades de que se repitan los números ganadores. Por último, hemos de tener en cuenta el efecto de las combinaciones: cada vez que se extrae un resultado, este puede contener los mismos números que *cualquiera* de los sorteos anteriores. Al igual que en el problema del cumpleaños, si se celebra una lotería n veces, existen $n\,(n - 1)/2$ pares de sorteos que podrían incluir los mismos números ganadores.

EN SÍNTESIS

Algunos acontecimientos que juzgamos extremadamente improbables se suceden una y otra vez. La ley de los grandes números y la combinatoria nos permiten entender por qué.

Por ejemplo, basta reunir a 23 personas para que la probabilidad de que dos de ellas cumplan años el mismo día ascienda a 0,51 (es decir, supere el 50 por ciento).

El 10 de septiembre de 2009, la lotería primitiva búlgara premió los mismos seis números que la semana precedente. En realidad, tales acontecimientos resultan casi inevitables.

En la lotería primitiva búlgara se extraen seis números comprendidos entre el 1 y el 49. La probabilidad de que resulte seleccionado cualquier conjunto particular de números es de 1/13.983.816. Pero ¿cuál es la probabilidad de que coincidan dos sorteos *cualesquiera* después de tres tandas? ¿Y la de que lo hagan dos en un conjunto de 50?

Si solo consideramos tres sorteos, tendremos tres pares posibles. Pero si se celebran 50, el número de parejas se eleva a 1225. Con 1000 sorteos dispondremos de 499.500 pares posibles. En otras palabras, si el número de sorteos se multiplica por 20 (de 50 a 1000), el de parejas posibles lo hace por casi 408 (de 1225 a 499.500). Una vez más, nos adentramos en el reino de los grandes números.

¿Cuántos sorteos necesitaríamos para que la probabilidad de obtener los mismos seis números en dos de ellos fuese mayor que 1/2 (es decir, para que ese suceso fuese más probable que el contrario)? El mismo método que usamos en el problema del cumpleaños nos da la respuesta: 4404 sorteos.

Maureen Wilcox adquirió dos boletos con los números ganadores de la lotería de Massachusetts y la de Rhode Island. Por desgracia, el billete de la lotería de Massachusetts contenía los números que resultaron premiados en la de Rhode Island, y viceversa

Dos sorteos a la semana equivalen a 104 al año. Por tanto, el número de sorteos necesarios se alcanza en menos de 43 años. Pasado ese tiempo, será más probable que improbable que dos sorteos hayan arrojado el mismo resultado. Sin duda, esta conclusión nos esboza una situación muy distinta de «coincidencia estrafalaria» que apreciaba la portavoz búlgara.

El razonamiento anterior se aplica a una sola lotería. Si tenemos en cuenta la gran cantidad de ellas que se celebran en todo el mundo, no podremos más que admitir que lo increíble sería que los resultados nunca se repitiesen. Así pues, ahora no debería causarle tanto asombro saber que el 16 de octubre de 2010 la lotería primitiva israelí, Mif'al Hapáis, arrojó los mismos números que habían aparecido dos semanas antes (13, 14, 26, 32, 33 y 36). Y puede que *a usted* ya no le sorprenda, pero, durante los días siguientes, los programas de radio israelíes recibieron un aluvión de llamadas que denunciaban el «amaño».

El resultado de la lotería búlgara fue inusual porque la repetición se produjo en dos sorteos consecutivos. Pero la ley de los grandes números, combinada con el hecho de que en todo el mundo se celebran de manera regular una gran cantidad de loterías, nos dice que no deberíamos asombrarnos demasiado. Y tampoco debería causarnos tanta sorpresa saber que lo mismo ya había ocurrido con anterioridad: en 2007, la lotería de Carolina del Norte, Cash 5, seleccionó los mismos números en los días 9 y 11 de julio.

Un ejemplo más frustrante ocurrió en 1980. Ese año, Maureen Wilcox adquirió dos boletos con los números ganadores de la lotería de Massachusetts y la de Rhode Island. Pero, por desgracia, era el billete de la lotería de Massachusetts el que contenía los números premiados en la de Rhode Island, y viceversa. Si compramos billetes de 10 loterías distintas, tendremos 10 posibilidades de ganar. Pero 10 boletos dan pie a 45 posibles parejas, por lo que la probabilidad de que alguno de ellos coincida con uno de los 10 resultados ganadores —sin importar cuál— supera en más de cuatro veces a la probabilidad de resultar premiado. Por razones obvias, nada de esto nos brinda una receta para amasar una fortuna: que un billete contenga el resultado de otra lotería no nos aporta nada, más que la sospecha de que el universo entero se está mofando de nosotros.

La combinatoria se aplica a aquellas situaciones en las que interactúan varias personas u objetos. Consideremos las maneras de organizar el trabajo en una clase de 30 estudiantes. Si cada uno de ellos lleva a cabo su tarea por sí solo, tendremos 30 «grupos» de trabajo. Pero, si lo hacen por parejas, podrán formar 435 dúos; si se agrupan de tres en tres, tendremos 4060 tríos posibles, y así sucesivamente. Por supuesto, la cuenta se detiene cuando ponemos a todos a trabajar juntos. En tal caso solo hay un conjunto posible: el formado por los 30 alumnos.

En total, el número de grupos posibles que pueden formar 30 estudiantes asciende a 1.073.741.823: más de mil millones con tan solo 30 personas. En general, en un conjunto de n elementos resulta posible seleccionar $2^n - 1$ subconjuntos. Si $n = 100$, obtenemos $2^{100} - 1$. Este número es aproximadamente igual a 10^{30}: una cantidad absolutamente abrumadora desde cualquier punto de vista.

Si 10^{30} no le parece lo suficientemente grande, considere la World Wide Web. La Red cuenta con unos 2500 millones de usuarios, cada uno de los cuales puede interaccionar con cualquier otro. Tenemos en torno a $3 \cdot 10^{18}$ parejas y unos $10^{750.000.000}$ grupos posibles. Incluso los acontecimientos con una posibilidad disparatadamente pequeña se convertirán en algo casi ineludible si les concedemos un número suficiente de oportunidades.

La próxima vez que se encuentre ante una extraña coincidencia, recuerde el principio de improbabilidad.

PARA SABER MÁS

The science of Murphy's Law. Robert A. J. Matthews en *Scientific American*, abril de 1997.

Duelling idiots and other probability puzzlers. Paul J. Nahin. Princeton University Press, 2000.

Miracle on probability street. Michael Shermer en *Scientific American*, agosto de 2004.

Symmetry and the monster: One of the greatest quests of mathematics. Mark Ronan. Oxford University Press, 2006.



COPIPHORA GORGONENSIS se ha descubierto, junto con otras nuevas especies de saltamontes, en el colombiano Parque Natural Gorgona. Su diminuto oído presenta una sorprendente semejanza con el de los humanos.

Fernando Montealegre-Z es entomólogo y profesor de biología sensorial y biomecánica en la Universidad de Lincoln, en Inglaterra. Centra su investigación en la comunicación acústica en insectos, con particular interés en la sensibilidad ultrasónica y la bioingeniería.



BIOFÍSICA

EL REFINADO OÍDO DEL SALTAMONTES

Un caso de evolución convergente con el oído de los mamíferos

Fernando Montealegre-Z

¿En qué se parece un humano a un saltamontes? A primera vista, en nada. Sin embargo, en 2012 se descubrió que ambos han desarrollado un mecanismo semejante para poder percibir los sonidos del mundo que los rodea. El hallazgo se realizó en ciertos saltamontes (o chapulines) de las selvas tropicales y ofrece un claro ejemplo de convergencia evolutiva, en la que dos organismos no emparentados filogenéticamente han resuelto los problemas biofísicos de la audición mediante estrategias semejantes.

EN SÍNTESIS

La percepción del sonido se desarrolla en los humanos en tres etapas: captación, transformación y análisis de frecuencias. Se pensaba que era un proceso exclusivo de los vertebrados superiores, pero se ha descubierto que opera también en los saltamontes.

Asimismo, la exploración de estos insectos mediante microtomografía de rayos X ha revelado la existencia de un nuevo órgano, la vesícula auditiva, pieza clave en la audición.

El conocimiento derivado del estudio de estos oídos, diminutos y de gran eficiencia acústica, permitirá mejorar el diseño y las prestaciones de audífonos y microsensores.

Todo empezó en 2008, cuando, junto con Daniel Robert, experto en sistemas sensoriales de insectos de la Universidad de Bristol, y otros colaboradores, emprendimos un proyecto financiado por el Programa Científico Fronteras Humanas (HFSP, por sus siglas en inglés) con el propósito de ahondar en el funcionamiento del oído de los saltamontes.

En concreto, nos interesaba la tráquea acústica, un tubo derivado del sistema respiratorio que opera en estos diminutos organismos como una perfecta guía de sonido: lo conduce del tórax al oído (que en estos insectos se aloja en las patas delanteras) sin que escape por las paredes. Un sistema similar existe también en otros ortópteros como los grillos comunes y los grillos topo, pero en los saltamontes opera en un intervalo más amplio de frecuencias. Pensábamos que si lográbamos caracterizar los materiales de ese pequeño conducto de aire y sus estructuras adyacentes (fluidos, músculo y grasa), podríamos proponer mejoras en el diseño de los audífonos para las personas con sordera (en estos aparatos el sonido a veces escapa del tubo central y regresa al micrófono, causando interferencias muy molestas para el usuario).

Organizamos, pues, una expedición al Parque Nacional Natural Gorgona, una isla de selvas lluviosas del Pacífico colombiano, con el objetivo de recolectar unos cuantos saltamontes. Dado que antes de la última glaciación la isla había formado parte del continente y de la selva lluviosa costera que allí existe actualmente, suponíamos que debía albergar numerosas especies de insectos. Logramos el apoyo económico de National Geographic y la colaboración de la Unidad de Parques Nacionales de Colombia. Después de pasar unas dos semanas trabajando de noche con linternas frontales (se trata de insectos nocturnos), capturamos varios ejemplares de saltamontes, algunos pertenecientes a especies desconocidas hasta la fecha.

HALLAZGOS INESPERADOS

De vuelta al laboratorio en Bristol, acometimos una serie de experimentos. Nos centramos, sobre todo, en la especie *Copiphora gorgonensis*. Las pruebas consistían en enviar sonido a la pequeña tráquea acústica del saltamontes y monitorizar su desplazamiento a través de la cutícula de las patas anteriores mediante vibrometría láser (una técnica basada en el efecto Doppler que permite determinar el estado de vibración de una superficie). En general, no se observaron fugas. Sin embargo, para sorpresa de todos, al llegar a la tibia en la pata anterior (la zona donde se aloja el oído), detectamos una vibración intensa, totalmente inesperada. ¿Qué estaba ocurriendo?

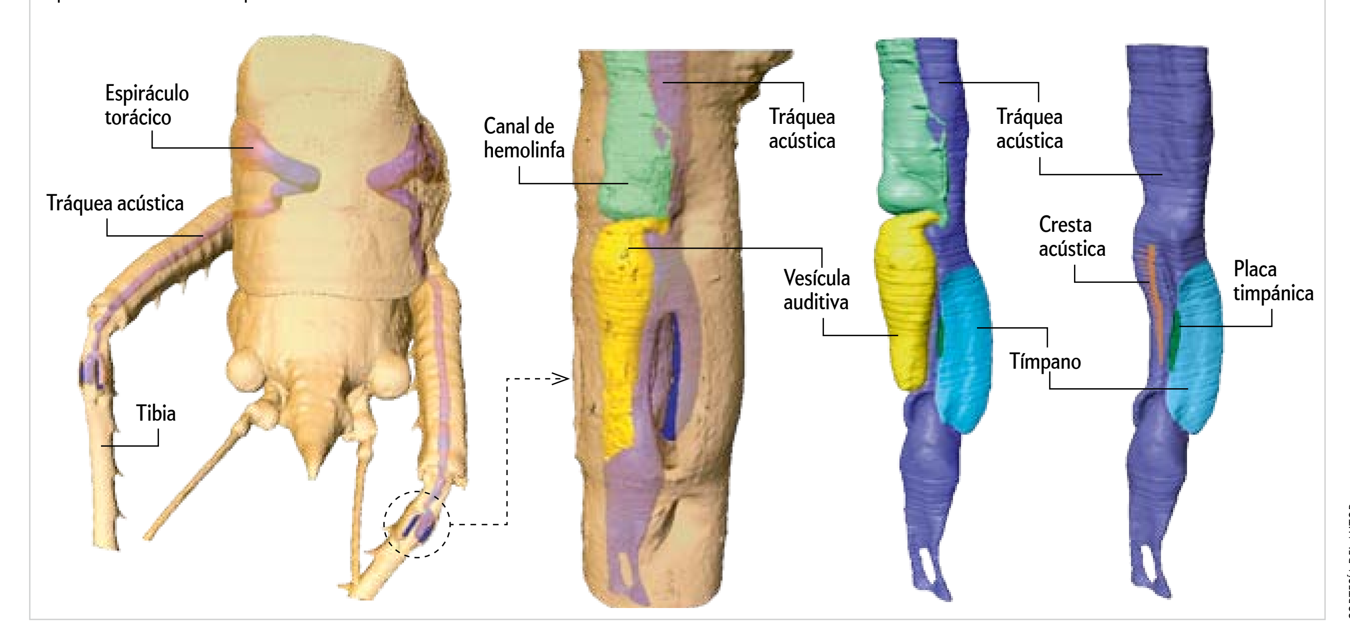
En ese momento, la investigación cambió de rumbo. Queríamos averiguar de dónde procedía esa señal: cómo se generaba. Pero ¿cómo podríamos desentrañar las complejidades de un sistema tan diminuto? Fue entonces cuando decidimos recurrir a la microtomografía computarizada de rayos X. Nos permitiría obtener imágenes del interior del oído del insecto. Ello sig-

ANATOMÍA

Un nuevo órgano auditivo

En los saltamontes, los oídos se alojan en la tibia de las patas delanteras. En cada uno, el tímpano (*azul claro*) se apoya en la tráquea acústica (*violeta*), un tubo lleno de aire que deriva del sistema respiratorio y se origina en el espiráculo torácico. Para comprender mejor el funcionamiento y la estructura de este conducto, el autor y sus colaboradores llevaron a cabo una serie de microtomografías de rayos X. Descubrieron así un nuevo órgano: la vesícula auditiva (*amarillo*), una pequeña bolsa que contiene el líquido en el cual se propagan las ondas sonoras procedentes del tímpano.

El sonido ambiental que se capta en el espiráculo torácico es amplificado en la tráquea y conducido hacia los tímpanos; estos transfieren luego las vibraciones a la vesícula auditiva a través de la placa timpánica, un parche de cutícula endurecida (*verde oscuro*). La placa timpánica acopla la membrana timpánica con la vesícula auditiva y la cresta acústica (*naranja*), estructura donde reposan las células receptoras. Allí se produce la descomposición de las ondas de presión en sus respectivas frecuencias. La energía sonora sobrante se libera finalmente hacia el canal de hemolinfa (*verde claro*).



CORTESÍA DEL AUTOR

nificó un gran paso adelante en el proyecto y nos convirtió en pioneros en el uso de esta técnica para el estudio de estructuras tan pequeñas en insectos [*véase* «Microtomografías de invertebrados», por Javier Alba Tercedor, *en este mismo número*].

Las microtomografías demostraron que bajo la cutícula vibrante se alojaba una vesícula llena de líquido, a través del cual se propagaban las ondas procedentes del tímpano. Acabábamos de descubrir la vesícula auditiva, un nuevo órgano del oído del saltamontes. Pero eso no fue todo. Al juntar todas las piezas del rompecabezas nos dimos cuenta de algo más sorprendente todavía: que ese diminuto sistema auditivo guardaba una gran semejanza funcional con el nuestro. Veamos en qué consiste este parecido.

CAPTAR, ADAPTAR Y ANALIZAR

En los mamíferos, la audición se divide en tres etapas básicas: captación y preamplificación del sonido; adaptación y segunda amplificación de la señal acústica, y análisis de frecuencias y tercera amplificación. Cada una de ellas se desarrolla en una parte anatómicamente diferenciada del oído: la captación de las ondas sonoras se realiza en la oreja, el canal auditivo y el tímpano; la transferencia de las ondas, que deben pasar de un medio gaseoso (aire) a uno líquido (el interior de la cóclea), se produce a través de los huesecillos del oído medio, y el procesamiento final de la señal ocurre en la cóclea (*véase el recuadro* «La audición en tres actos»).

Este complejo sistema auditivo se había identificado solo en los vertebrados superiores, entre ellos los mamíferos. Pero nuestra investigación ha demostrado que un mecanismo equivalente opera también en los saltamontes. ¿Cómo se desarrollan las tres etapas en ambos organismos?

VÍAS DE ENTRADA

El sonido llega a cada uno de nuestros oídos y golpea la membrana timpánica en su superficie externa. En los saltamontes, en cambio, el sonido golpea ambas superficies del tímpano, la externa y la interna. El sonido se capta, por tanto, por dos canales: la superficie timpánica externa y la tráquea acústica, que conduce el sonido hacia la superficie interna. Cada vía de entrada produce diferentes modos de amplificación y de velocidad de propagación de la señal acústica. Las vibraciones que llegan a la superficie externa del tímpano viajan en el aire a la velocidad normal del sonido (340,29 metros por segundo a nivel del mar); las que llegan a la superficie interna viajan por la tráquea a una velocidad inferior (entre 150 y 250 metros por segundo). Por tanto, en los saltamontes, una señal tiene dos tiempos de llegada al tímpano. Como veremos a continuación, este «desfase» los ayuda a saber de dónde procede el sonido.

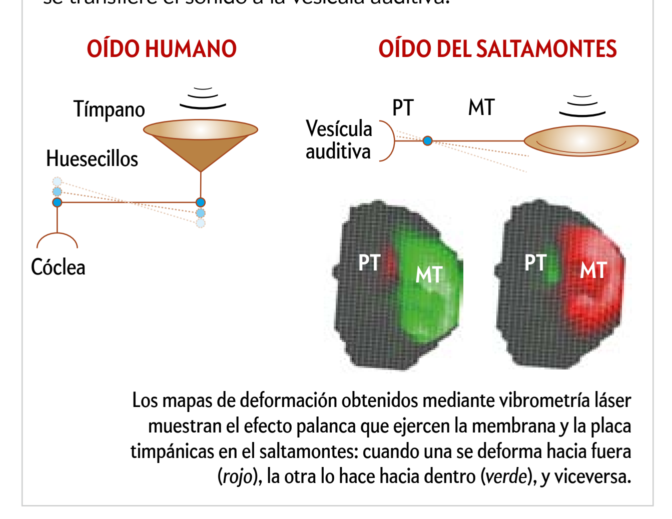
Para determinar la posición de la fuente sonora, los mamíferos comparan y analizan las diferencias entre la señal que capta el oído derecho y la que capta el izquierdo. Por un lado, debido a la distancia craneal que separa ambos oídos, estas señales llegan con tiempos distintos. Por otro, también presentan diferencias en intensidad, causadas por la dispersión del sonido que produce la cabeza (efecto de sombra).

Los saltamontes, en cambio, al ser tan diminutos, requieren de un mecanismo todavía más refinado y sensible para averiguar la procedencia de un sonido. Aun cuando sus oídos se encuentran separados por la distancia entre patas (mayor que la que habría si estos se alojaran en la cabeza, como en los mamíferos), se trata de una distancia muy pequeña. Para estimar las diferencias entre las señales que reciben en cada pata, estos

MICROMECÁNICA

Efecto palanca

En humanos y saltamontes, el mecanismo que permite amplificar y transferir el sonido de un medio gaseoso a otro líquido se basa en un sistema de palanca. En el mamífero (*izquierda*), la micropalanca la forman los tres huesecillos que conectan el tímpano con la cóclea. En el insecto (*derecha*), de ello se encarga la placa timpánica (PT), que vibra con fase opuesta a la membrana timpánica (MT); mediante este acoplamiento se transfiere el sonido a la vesícula auditiva.



Los mapas de deformación obtenidos mediante vibrometría láser muestran el efecto palanca que ejercen la membrana y la placa timpánicas en el saltamontes: cuando una se deforma hacia fuera (*rojo*), la otra lo hace hacia dentro (*verde*), y viceversa.

CORTESÍA DEL AUTOR (*mapas de deformación*)

insectos comparan los tiempos de llegada y la intensidad de las vibraciones en cada una de las superficies timpánicas. Dado que en el interior de la tráquea acústica la velocidad del sonido se reduce hasta en un cincuenta por ciento, el sonido llega primero a la cara externa que a la interna del tímpano. Además, debido al efecto de amplificación que ejerce la tráquea acústica, la intensidad es mayor en el lado interno que en el externo. A través del análisis de todas estas variables, el saltamontes puede estimar de dónde procede el sonido.

DE GAS A LÍQUIDO

Una vez las vibraciones han llegado al tímpano, deben ser transmitidas al oído interno. Pero topan con una dificultad: han de pasar de un medio gaseoso (oído externo) a uno líquido (oído interno). En los mamíferos, esta transición se consigue mediante la acción de la cadena de huesecillos que conectan el tímpano con la cóclea: el martillo, el yunque y el estribo. El estribo es el hueso más pequeño del cuerpo humano; se incrusta en la cóclea a través de una pequeña ventana recubierta por una membrana, la ventana oval. La estrecha conexión de los huesecillos y sus longitudes desiguales hacen que el conjunto opere como una palanca: la vibración del martillo se transmite al yunque, y este golpea al estribo inmediatamente.

La superficie de la ventana oval es mucho más pequeña que la del tímpano: la proporción entre las dos áreas varía entre 12,5 y 21,1; en humanos, es de alrededor de 17. Esta diferencia de tamaño hace que las ondas, al pasar del tímpano a la ventana oval, se amplifiquen y aumenten su potencia. En el tímpano, las vibraciones procedentes del aire exterior presentan una gran amplitud y ejercen poca fuerza. Al pasar a la ventana oval, dado que esta posee una superficie inferior no tienen más remedio que perder amplitud; pero, como

La audición en tres actos

Nuestro oído (así como el del resto de los mamíferos) y el del saltamontes presentan una gran semejanza funcional. En ambos operan tres etapas básicas: captación del sonido y preamplificación; transferencia de medio gaseoso a medio líquido y segunda amplificación, y análisis de frecuencias y tercera amplificación. El siguiente esquema ilustra el modo en que se desarrollan los tres pasos en ambos organismos. Pese a las particularidades que muestra cada uno, sorprenden las numerosas analogías, en especial en el mecanismo de transferencia de las ondas sonoras al medio líquido del oído interno.

OÍDO HUMANO

Huesecillos
Ventana oval
Tímpano
Cóclea
Canal auditivo
Ventana circular

OÍDO DEL SALTAMONTES

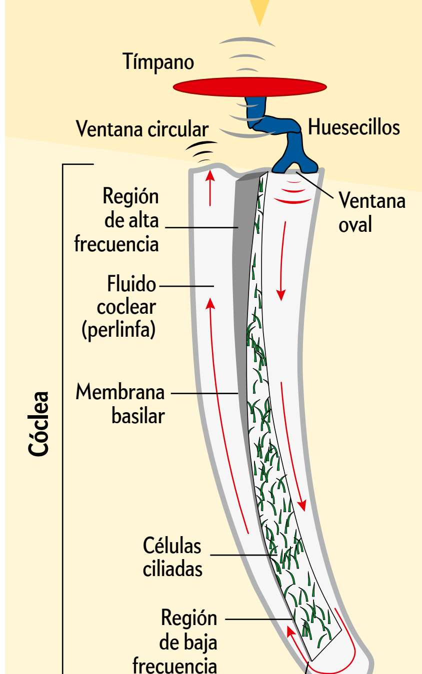


1. Captación del sonido

Las ondas sonoras entran primero por el canal auditivo, que las amplifica y las conduce hasta el tímpano. Los insectos cuentan, además, con una segunda vía de entrada del sonido: la superficie externa de la membrana timpánica, en contacto con el exterior.

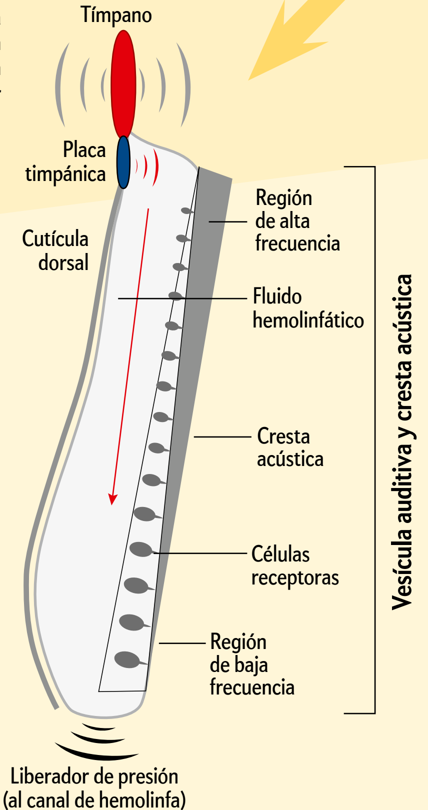
2. Transferencia al medio líquido

En los humanos, un engranaje de tres huesecillos amplifica las ondas sonoras y las transfiere del tímpano a la cóclea por la ventana oval. En los insectos, la transferencia (en este caso del tímpano a la vesícula auditiva) y la amplificación se producen mediante un fenómeno equivalente: el efecto palanca que ejercen la membrana timpánica y la placa timpánica al vibrar con fase opuesta.



3. Análisis de frecuencias

Una vez en el medio líquido, las ondas se propagan y van llegando a una batería de células que las transforman en impulsos nerviosos. En los humanos, de ello se encargan las células ciliadas alojadas en la membrana basilar; en los saltamontes, las células receptoras de la cresta acústica. Cada una responde a una frecuencia determinada según su posición: las sensibles a frecuencias altas residen en la región próxima al tímpano; las sensibles a frecuencias bajas, en el extremo opuesto. Dado que los fluidos (coclear y hemolinfático) son incompresibles, la energía sonora sobrante debe liberarse: en los humanos, ello ocurre a través de la ventana circular; en los saltamontes, a través de una abertura que conecta con el canal de hemolinfa.



CORTESÍA DEL AUTOR (*dibujos*)

contrapartida, ganan potencia (la energía se concentra en un espacio más reducido).

Por tanto, las vibraciones que llegan a la cóclea han sufrido dos etapas de amplificación: la primera en el oído externo (pabellón auricular y canal auditivo), cuya forma cónica produce un efecto de cuerno o bocina exponencial; y la segunda en el oído medio (tímpano, huesecillos y ventana oval).

Lo que descubrimos en nuestros experimentos es que también los saltamontes cuentan con un mecanismo que les permite amplificar y transferir las ondas sonoras de un medio gaseoso (aire del tímpano) a otro líquido (fluido de la vesícula auditiva). Nos referimos al acoplamiento de la membrana timpánica y la placa timpánica (un parche grueso de cutícula endurecida, derivada de la membrana timpánica), que vibran con fase opuesta. En conjunto, operan como una palanca de primera clase, en la que las vibraciones de la membrana se transmiten a la placa mediante una suerte de fulcro intermedio; desempeñan la misma función que los huesecillos del oído de los mamíferos. Debido a la diferencia de tamaño entre ambas estructuras (la membrana timpánica es entre 12 y 15 veces mayor que la placa), las vibraciones de gran amplitud y baja fuerza de la membrana se convierten, una vez transferidas a la placa, en oscilaciones de menor amplitud y mayor fuerza. La señal se amplifica en un factor de diez. Se desconoce si este mecanismo de transferencia opera en todas las especies de saltamontes (unas 6500 conocidas). Hasta la fecha, se ha observado en *C. gorgonensis*, *Panacanthus pallicornis*, *Artiotonus captivus* y *Metrioptera sphagnorum*.

Después de llegar a la cóclea, ¿qué camino sigue el sonido? En 1961, el físico húngaro experto en audición Georg von Békésy, entonces en la Universidad Harvard, fue galardonado con el premio Nobel de medicina por arrojar luz sobre esta cuestión. Mediante experimentos en cuerpos recientemente fallecidos descubrió las ondas de propagación en la cóclea humana. (Posteriormente, la existencia de estas ondas se ha demostrado en vivo, de forma indirecta, en numerosas especies animales.)

En efecto, en la cóclea las ondas sonoras se propagan en sentido único, hacia el interior de la misma. Y, debido al acoplamiento que se produce entre el fluido coclear y la membrana basilar, sufren una amplificación.

Ahora sabemos que un fenómeno equivalente tiene lugar en el oído de los saltamontes: allí, el fluido de la vesícula auditiva interacciona con la cresta acústica, amplificando las ondas. Estas intensas vibraciones son precisamente las que detectamos en nuestros experimentos iniciales de vibrometría láser a través de la cutícula dorsal de la pata del insecto.

UNA BATERÍA DE RECEPTORES

La tercera y última etapa de la audición corresponde a la descomposición de la señal acústica en sus frecuencias constituyentes. Los oídos cuentan para ello con una batería de células mecanoreceptoras especializadas. Cada célula responde a una frecuencia determinada de acuerdo con su ubicación. Se trata, pues, de un caso de tonotopía.

En los mamíferos, son las células ciliadas de la cóclea las encargadas de desempeñar esta función. Responden a las vibraciones transmitidas por el fluido coclear y las transforman en excitación nerviosa. Se distribuyen de forma ordenada y lineal a lo largo de la membrana basilar. Esta presenta un gradiente de rigidez, anchura y grosor: es rígida, angosta y gruesa en su parte más próxima al tímpano, y más elástica, ancha y fina en el extremo opuesto. Dado que la frecuencia de resonancia de una estructura vibrante es directamente proporcional a su rigidez, las células ciliadas sensibles a frecuencias altas se alojan cerca del tímpano (región rígida); las sensibles a frecuencias bajas, lejos del tímpano (región elástica), y las de frecuencias intermedias, entre los dos extremos.

Los saltamontes poseen también células mecanorreceptoras. Residen en la cresta acústica, una estructura triangular y ligeramente convexa. Las microtomografías de rayos X que hemos obtenido para las cuatro especies de saltamontes estudiadas muestran que es más gruesa en el extremo angosto que en el ancho. Como las células ciliadas de los mamíferos, las células receptoras de los saltamontes se organizan de forma tonotópica: las sensibles a frecuencias altas residen en la parte angosta, gruesa y rígida de la cresta acústica, próxima al tímpano; las sensibles a frecuencias bajas, en la parte opuesta, más ancha, fina y elástica. La cresta acústica sería, por tanto, el equivalente de la membrana basilar de la cóclea de los mamíferos: una estructura laminar con una anisotropía mecánica que produce el gradiente tonotópico observado.

La vesícula auditiva de estos insectos presenta la misma forma triangular que la cresta acústica —la recubre—, pero es más voluminosa. Se trata de una cavidad parcialmente cerrada: es angosta y cerrada en su extremo próximo al tímpano, y expandida y abierta en el lado opuesto, donde conecta con el canal principal de hemolinfa (la sangre del insecto) a través de una constricción que varía en diámetro según la especie. En las cuatro especies tropicales estudiadas, hemos observado en los dos extremos de la vesícula auditiva un tapón de material coloidal; sin embargo, se desconocen todavía su naturaleza y función.

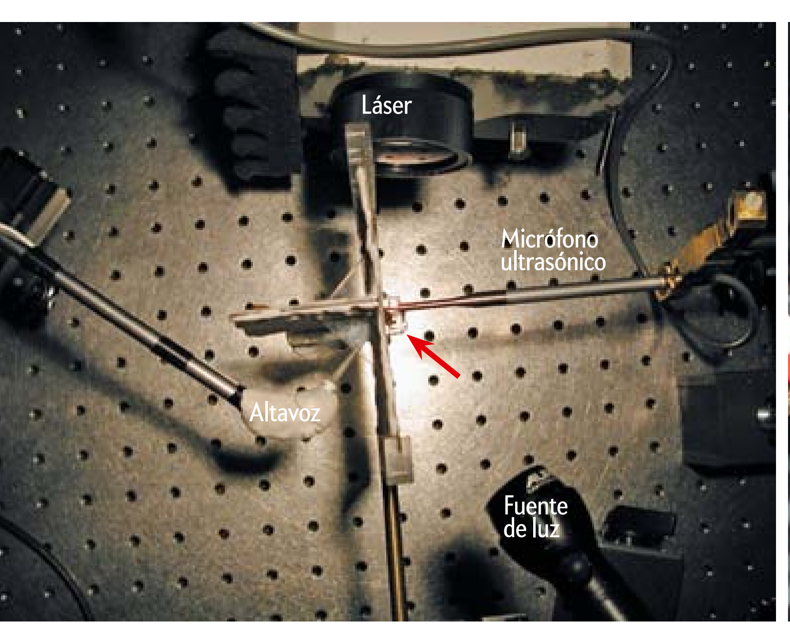
La estrecha relación entre la vesícula auditiva y la cresta acústica de los saltamontes no se conocía, ya que tradicionalmente la cavidad de la vesícula se consideraba simplemente una continuación del canal hemolinfático en la pata delantera. Nuestros hallazgos han demostrado, en cambio, que se trata de una pieza clave en la audición de estos artrópodos, ya que proporciona un medio para la propagación de ondas y además facilita la descomposición de frecuencias y la amplificación final de la señal.

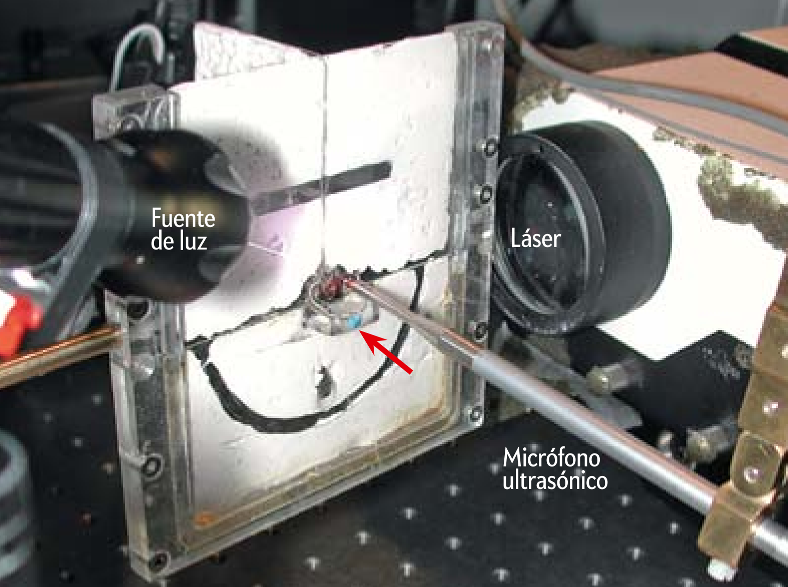
El fluido de la vesícula auditiva reviste especial interés. Mediante experimentos en los que se ha procedido a su evacuación, se ha demostrado que su ausencia altera notablemente el sistema: cambia la fase de vibración de la membrana y la placa timpánicas, dificulta la propagación de las ondas y parece que disminuye la respuesta eléctrica de las células receptoras de la cresta acústica. Ello sugiere que, además de estabilizar la vibración de todo el sistema (tímpanos, placas timpánicas y cresta acústica), posee una composición química especial. Análisis preliminares realizados en nuestro laboratorio indican que este líquido no es hemolinfa. Contiene lípidos y quizá cationes, que facilitarían la transformación de las ondas de propagación en impulsos eléctricos. Podría tratarse de otra forma de convergencia con el fluido coclear de los mamíferos.

VENTANAS LIBERADORAS

¿Qué ocurre con la energía sonora sobrante, la que no es convertida en señal eléctrica por las células mecanorreceptoras? Dado que ni el fluido coclear de los humanos ni el que llena la vesícula auditiva de los saltamontes pueden comprimirse, debe existir algún mecanismo que permita compensar los cambios de presión que causa la llegada del sonido.

En el oído de los mamíferos, la energía sobrante se libera a través de la ventana circular, una estructura con capacidad de





LAS PRUEBAS DE VIBROMETRÍA LÁSER con organismos tan diminutos requieren una gran paciencia. Los investigadores tardaron unos dos años en completar el diseño de este experimento (en las fotografías, vista superior y lateral del montaje). El insecto intacto se inmobiliza en una plataforma especial (*flecha roja*) que permite acceder a su oído mediante un láser, que detecta las vibraciones generadas por un altavoz. Este transmite el sonido mediante una sonda, que lo dirige hacia el espiráculo y la tráquea acústica con el propósito de que llegue solo a la superficie interna del tímpano y así tener más control sobre el experimento. El micrófono ultrasónico verifica que el sonido del altavoz no pase al otro lado de la pared, de modo que no pueda alcanzar la superficie externa del tímpano y producir interferencias. Se trata de un procedimiento no invasivo; una vez finalizada la prueba, el insecto se devuelve a la jaula (en la que se intenta reproducir su hábitat natural).

plegamiento. La ventana circular y la ventana oval vibran, por tanto, con fase opuesta: cuando una sufre una presión hacia dentro, la otra la sufre hacia afuera.

En los saltamontes, las ondas de propagación se disipan a través de la zona que conecta la vesícula auditiva con el canal de hemolinfa. Este elemento liberador se halla acompañado por un tapón de material coloidal. La cantidad de energía sobrante disipada varía de una especie a otra y quizá guarde relación con la estrechez de esta conexión.

PRÓXIMOS RETOS

A diferencia de Von Békésy, que tuvo que diseccionar cadáveres para investigar la mecánica de la audición en los humanos, nosotros lo hemos tenido mucho más fácil para ahondar en el oído del saltamontes. Al ser un órgano de fácil acceso, el estudio de su funcionamiento puede realizarse de forma no invasiva. Por un lado, presenta una estructura linear (a diferencia de la cóclea de los mamíferos, que se halla enrollada en forma de caracol —de aquí su nombre—). Por otro, su composición facilita el seguimiento de las vibraciones internas mediante vibrometría láser a través de la cutícula que lo protege, sin tener que destruirlo ni evacuar el fluido para exponer la superficie de la cresta acústica. Esta facilidad de experimentación, sin duda, nos anima a seguir avanzando en este campo.

Entre los nuevos proyectos que estamos desarrollando destaca el estudio de una especie de saltamontes con una capacidad sorprendente: se comunica a través de canales ultrasónicos (150 kilohercios) imperceptibles para los humanos (que oímos frecuencias máximas de 20 kilohercios). La descubrimos también en el Parque Natural Nacional Gorgona y la bautizamos con el nombre de *Supersonus aequoreus*. Nuestro objetivo es ahora comprender su sistema auditivo, con el propósito de mejorar las prestaciones de los microsensores y micrófonos sensibles a estas frecuencias.

Asimismo, a raíz de las investigaciones descritas en este artículo se nos han planteado nuevas incógnitas. Hemos estudiado el fenómeno de la audición en cuatro especies de saltamontes. Sin embargo, existen unas 6500 —o quizá más— especies de estos insectos en todo el planeta. ¿Poseen todas ellas el mismo oído refinado que *C. gorgonensis*? ¿Cuál es la variabilidad funcional de este mecanismo sensorial? ¿Cuál sería la mejor especie modelo para futuros estudios comparativos entre la cóclea de los mamíferos y la vesícula auditiva de los insectos? Confiamos en que las próximas investigaciones nos ayudarán a resolver estas y otras cuestiones sobre la biofísica de la audición.

PARA SABER MÁS

Experiments in hearing. G. von Békésy. McGraw-Hill, Nueva York, 1960.
Mechanics of the mammalian cochlea. L. Robles y M. A. Ruggero en *Physiological Reviews*, vol. 81, n.º 3, págs. 1305-1352, julio de 2001.
Cochlear outer hair cell motility. J. Ashmore en *Physiological Reviews*, vol. 88, n.º 1, págs. 173-210, enero de 2008.
Tonotopically arranged traveling waves in the miniature hearing organ of bushcrickets. A. Palghat Udayashankar et al. en *PLOS One*, vol. 7, n.º 2, pág. e31008, febrero de 2012.
Convergent evolution between insect and mammalian audition. F. Montealegre-Z et al. en *Science*, vol. 338, n.º 6109, págs. 968-971, noviembre de 2012.

EN NUESTRO ARCHIVO

Células ciliadas del oído interno. A. J. Hudspeth en *IyC*, marzo de 1983.
Recibido y oído. Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik en *IyC*, abril de 2009.





CARA de una avispa papelera vista por otro individuo de la misma especie.



PERCEPCIÓN

RECONOCIMIENTO FACIAL EN INSECTOS

La habilidad para reconocer caras no es exclusiva de los mamíferos. También ciertas avispas y abejas demuestran una pericia asombrosa en esta tarea

Elizabeth A. Tibbetts y Adrian G. Dyer

Elizabeth A. Tibbetts es profesora de la Universidad de Michigan. Estudia la influencia de la evolución en el comportamiento y la cognición animales.

Adrian G. Dyer es profesor del Real Instituto de Tecnología de Melbourne. Realiza estudios etológicos para investigar el modo en que los sistemas visuales de diversos animales procesan la información compleja.



Suele pensarse que las abejas y las avispas que revolotean en los jardines poseen un cerebro rudimentario: construyen colmenas y avisperos, recolectan néctar, crían sus larvas y mueren, todo ello en el transcurso de un año o unos meses. Pero algunos de estos himenópteros rivalizan con los humanos y otros primates en una aptitud intelectual: el reconocimiento facial de los congéneres.

En concreto, los miembros de una especie de avispa papelera identifican y recuerdan las marcas faciales de cada individuo y emplean esa información en sus relaciones sociales, del mismo modo que las personas aprenden a reconocer el semblante de familiares, amigos y conocidos para desenvolverse en sociedad. Y sus habilidades no acaban ahí: es posible adiestrar insectos que de natural no memorizan caras para que lo hagan, en ciertos casos incluso rostros humanos.

Una conocida teoría sobre la inteligencia sostiene que el voluminoso cerebro humano es fruto de la necesidad de distinguir y recordar un gran número de iguales en la compleja sociedad humana. Pero el descubrimiento de que unos insectos cuyo cerebro apenas representa el 0,01 por ciento del humano son capaces de reconocer a los congéneres por su rostro obliga a replantearse tanto el origen de esta sorprendente habilidad como las características cerebrales que la hacen posible. La respuesta a esta cuestión podría resultar útil para los ingenieros informáticos que quieren mejorar los programas de reconocimiento facial.

UN HALLAZGO FORTUITO

Como en tantos otros hallazgos científicos, la fortuna influyó en el descubrimiento del reconocimiento facial en las avispas. En 2001, la joven graduada E. A. Tibbetts (uno de los autores) andaba enfrascada en un proyecto destinado a desvelar los entresijos de la vida social de la avispa papelera *Polistes fuscatus*. Para ello, era preciso marcar el dorso de los insectos con puntos de colores y filmar el enjambre para estudiar las relaciones entre sus integrantes. Un día, nuestra protagonista olvidó marcar dos avispas de un enjambre: la filmación no serviría de nada a menos que pudiera diferenciar una de otra. Mientras visionaba la grabación se percató de que podía distinguirlas si observaba con detenimiento las franjas y las manchas amarillas, marrones y negras que surcaban el rostro de las avispas. Y entonces se preguntó si ellas también podrían hacerlo.

La investigadora no pudo resistir la tentación de poner a prueba esa hipótesis. Dedicó los días siguientes a verificar la prodi-

EN SÍNTESIS

Hasta hace poco se creía que la capacidad para reconocer distintos rostros requería un cerebro de mamífero desarrollado.

Los estudios con avispas papeleras y abejas melíferas demuestran que el diminuto cerebro de algunos insectos también puede ejecutar esa tarea.

Estos insectos utilizan un mecanismo de procesamiento facial similar al que emplean los humanos para distinguir las caras.

Tal descubrimiento podría ayudar a mejorar los programas de reconocimiento facial.

giosa diversidad de marcas faciales de las avispas y se dispuso a comprobar si podían servir como un medio de reconocimiento mutuo. Echando mano de una refinada técnica, con la ayuda de un mondadientes y pintura de modelismo, alteró los rasgos faciales de algunas de ellas y observó las reacciones de las compañeras del enjambre. Las agresiones son raras en los avisperos, por lo que si las congéneres trataban con rudeza a las avispas maquilladas, el cambio de actitud demostraría que prestaban atención a las caras. Como población de control, pintó algunos individuos sin modificar su aspecto para descartar la posibilidad de que reaccionasen a algún componente o propiedad de la pintura y no a su efecto visual. Comprobó que las avispas maquilladas desataban una reacción mucho más agresiva que las de control; la relación de estas con el resto del enjambre no varió en absoluto. Los resultados demostraban que las avispas se reconocían entre sí gracias a los dibujos faciales.

Tibbetts se quedó boquiabierta. Para entender lo sorprendente de este descubrimiento, pensemos un poco en cómo identificamos las caras. Primero hemos de captar una disposición particular de los rasgos singulares (nariz, boca, ojos y orejas, entre otros) y vincular mentalmente esa fisonomía con información más abstracta sobre la persona, trátese de nuestro jefe o de un vecino. Y después, hemos de recordar ese vínculo cada vez que nos cruzamos con esa persona.

Resulta interesante constatar que aprendemos a reconocer las caras con más rapidez y precisión que otros tipos de información visual compleja. De este modo, si uno acude como invitado a una fiesta, no tendrá que esforzarse demasiado para recordar las caras de los asistentes. Sin embargo, aprender los múltiples matices, igualmente singulares y complejos, de los ideogramas chinos le costará mucho más tiempo y empeño. Tanto los rostros como la escritura china están compuestos por múltiples elementos que conforman un todo mayor, pero somos mucho más diestros identificando caras porque la evolución ha dotado a nuestro cerebro de recursos específicos para ello. Este mecanismo de procesamiento se ha especializado tanto que basta con invertir la imagen para que deje de funcionar. De modo similar, las mínimas distorsiones en regiones fundamentales del rostro, como los ojos, pueden entorpecer el reconocimiento de un semblante familiar.

Los humanos destacan en esa habilidad, aunque cerca del 2 por ciento sufre algún tipo de deficiencia. La mayoría de los trastornos parecen tener un origen hereditario, pero también pueden surgir en la edad adulta como consecuencia de una lesión en el área fusiforme facial. Teniendo en cuenta la importancia de identificar a los otros en las sociedades humanas, tales alteraciones pueden resultar muy problemáticas. En los peores casos, los afectados presentan dificultades para reconocer a la pareja y los hijos. Asimismo, el desarrollo social anómalo de las personas con trastornos como el autismo podría atribuirse, al menos en parte, a problemas en el reconocimiento facial.

Dada la trascendencia de la especialización en el reconocimiento facial humano, Tibbetts se preguntó si las avispas papeleras habrían desarrollado una especialización similar o bien identificaban las caras de otro modo. Para hallar una respuesta, necesitaba un método fiable para enseñar a los insectos a prestar atención a las imágenes correctas y descartar las incorrectas. Los aciertos de las abejas melíferas se premian con azúcar y estas colaboran de buen grado porque una de sus principales ocupaciones en la colmena es justamente la recolección de alimento. En cambio, las avispas pueden sobrevivir semanas en ayunas y los intentos de adiestramiento con recompensas azucaradas

ILUSIÓN

Distorsión facial

La ilusión óptica de Margaret Thatcher, ideada por Peter Thompson, de la Universidad de York, revela que el procesamiento facial en los humanos está sumamente especializado. Nos cuesta reconocer una cara familiar cuando la imagen se gira cabeza abajo o se invierten los rasgos esenciales, como los ojos y la boca. Los insectos que aprenden a reconocer rostros también se equivocan cuando se les muestran imágenes distorsionadas, pero ignoramos si el procesamiento facial es igual que el nuestro.



CORTESÍA DE PETER THOMPSON, UNIVERSIDAD DE YORK

fracasaron estrepitosamente. Tibbetts y Michael Sheehan, por entonces estudiante de posgrado y hoy en la Universidad de California en Berkeley, descubrieron otro modo de entrenamiento: si volaban hacia la imagen errónea recibían una pequeña descarga eléctrica.

Gracias a esta nueva técnica, las avispas aprendieron a distinguir entre parejas de cinco tipos de imágenes: tres de rostros de avispas (normales, sin antenas o desfigurados por retoques digitales), dibujos geométricos sencillos en blanco y negro, y orugas enteras (presa natural de las avispas). Los insectos aprendieron a escoger con precisión los rostros normales en solo veinte intentos, pero distinguir las fotografías de las otras cuatro parejas no resultó tan sencillo: la supresión de las antenas y la alteración del orden de los componentes del rostro mermaban drásticamente la capacidad de reconocimiento facial.

La torpeza de las avispas a la hora de distinguir a las compañeras sin antenas supone un indicio muy sólido en favor de la existencia de sistemas neurales especializados en el reconocimiento facial. Las caras sin los apéndices lucían los mismos colores y dibujos que las normales, pero el sistema visual de la avispa no podía procesar e identificar bien la imagen retocada como una cara. El efecto que la supresión de las antenas causa en el aprendizaje indica que estos insectos, a semejanza de



LA CONSTATACIÓN de que las avispas *Polistes fuscatus* poseen marcas faciales propias de cada individuo llevó al descubrimiento de que los insectos utilizan esos rasgos como medio de identificación y de relación social en el enjambre. A semejanza de los humanos, las avispas captan y procesan el rostro como un conjunto, en lugar de reconocer cada rasgo por separado.

CORTESÍA DE LA UNIVERSIDAD DE MICHIGAN

las personas, reconocen las caras a través de algún tipo de mecanismo holístico.

Esto es, en lugar de memorizar cada rasgo facial por separado, uno a uno, perciben y procesan la cara entera. Por eso, los rasgos deben permanecer intactos y ordenados para que la avispa pueda identificarlos correctamente. La distorsión provocada por la eliminación de las antenas es equiparable al efecto que en nosotros causa girar un retrato cabeza abajo, invertir el brillo de la imagen o alterar el orden de los rasgos faciales.

Que los humanos y las avispas compartamos esta especialización facial hace pensar que el mecanismo podría resultar más común en el reino animal de lo que se pensaba. Su evolución habría sido propiciada por ciertas condiciones sociales. Los avisperos de *P. fuscatus* son fundados por grupos de reinas que colaboran para sobrevivir, pero que también compiten entre sí por la supremacía reproductora. En tales circunstancias, poder reconocer a los iguales y recordar el escalafón que ocupan en la jerarquía resulta provechoso. Siguiendo esa lógica, los animales que no precisan distinguir entre sí a sus congéneres no poseerían de ordinario ese mecanismo cognitivo.

Con objeto de analizar esta hipótesis, Tibbetts y Sheehan estudiaron el reconocimiento facial en *Polistes metricus*, una especie afín a *P. fuscatus* con organización social diferente. Los avisperos de *P. metricus* los funda una sola reina reproductora y por esta razón los miembros del avispero no gozan de ninguna ventaja social destacable por el hecho de diferenciar las caras. Tras demostrar que las avispas de esta especie no lucen variaciones en las marcas faciales y no reconocen a los individuos en condiciones naturales, supusieron que debían carecer del singular mecanismo cognitivo para procesar las caras que la compleja sociedad de *P. fuscatus* exige. Los resultados de sus investigaciones sustentan esta idea.

Si se las pone a prueba, las avispas *P. metricus* pueden reconocer caras, pero no sin dificultad; lo hacen más o menos con la misma rapidez y acierto que con otros tipos de imágenes. Por lo demás, la supresión de las antenas no influye en absolu-

to en la velocidad o la precisión del reconocimiento, lo cual parece descartar un mecanismo de procesamiento facial holístico. Perciben las caras de la misma manera que las demás imágenes: como un conjunto de rasgos independientes, tal vez del mismo modo en que nosotros aprendemos la escritura china.

CÓMO NOS VEN LAS ABEJAS

Dado que *P. metricus* logra reconocer caras si se la entrena, pese a que carece del mecanismo especializado necesario, cabe preguntarse si el cerebro de los insectos podría también diferenciar entre sí los rostros de una especie totalmente distinta: el ser humano. Inspirado por los primeros resultados con la avispa papelera, A. G. Dyer (uno de los autores), estudioso del procesamiento de la información visual en las abejas, quiso comprobar tal idea. Mediante un test neurológico corriente empleado en humanos, entrenó a abejas comunes para que memorizaran una cara y la distinguieran de otra (denominada cara de distracción). Los rostros son lo bastante parecidos para que las personas a veces se equivoquen; las abejas recibían una solución dulce de sacarosa cuando acertaban y otra amarga de quinina cuando erraban. Con cierta lentitud, después de cincuenta intentos, acabaron aprendiendo a diferenciar entre sí los dos rostros. Y también a seleccionar el correcto entre un grupo de rostros nuevos.

Otros experimentos efectuados con ese tipo de entrenamiento han desvelado similitudes sorprendentes entre los procesos de reconocimiento facial de la abeja y el hombre. La primera es que, a pesar de que las abejas no aprendieron a reconocer las caras con tanta rapidez como las avispas *P. fuscatus* o las personas, demostraron cierta capacidad de procesamiento holístico sin disponer de la red neural necesaria, carencia que las sitúa en desventaja respecto a las susodichas especies. En segundo lugar, podían memorizar e interpolar varias perspectivas de un rostro y después identificarlo desde un ángulo distinto. Una vez que la abeja había aprendido a reconocer una vista frontal y lateral, escogía una imagen del rostro girado 30 grados sin haberla visto antes. La capacidad de reconocimiento facial de las abejas resulta especialmente sorprendente porque su sociedad, integrada por una sola reina y un colectivo de obreras idénticas que ejecutan las mismas tareas, es mucho más sencilla que la de las avispas. Las abejas no poseen marcas faciales distintivas y las interrelaciones dentro de la colmena dependen sobre todo de complejas señales transmitidas con feromonas y no de indicaciones visuales.

Los resultados apuntan a que esta línea de investigación podría representar un filón para los sistemas automáticos de reconocimiento facial. Muchos consideran que la identificación del rostro desde ángulos diferentes supone uno de los grandes escollos que deben superarse en el reconocimiento artificial. Pero el minúsculo cerebro de las abejas es mucho más sencillo que el de los primates, por lo que si logramos descifrar los trucos que estas emplean para resolver ese problema complejo podríamos aplicarlos a la visión artificial y perfeccionar así los programas de reconocimiento facial.

Los estudios con insectos nos brindan pistas fundamentales sobre la posible evolución del reconocimiento facial. El sencillo mecanismo descubierto en las avispas *P. metricus* y las abejas melíferas, dos especies que en condiciones naturales no distinguen el rostro de sus compañeras, podría tener su origen en las habilidades generales de reconocimiento destinadas a la búsqueda de alimento. También podría representar un paso intermedio en la evolución de la especialización facial. Cuando los antepasados de las avispas *P. fuscatus* se hallaron inmersos en un nuevo entorno social en el que el reconocimiento de los individuos mejoraba las posibilidades de supervivencia y reproducción, quizás aprendieran a identificar a sus compañeras. Con el paso del tiempo, la selección natural habría refinado el mecanismo. En concreto, habría modificado el cerebro para generar la especialización facial que mejoró la capacidad de distinguir a los amigos de los enemigos con rapidez y seguridad. El sistema intermedio hizo posible que esta adaptación evolucionara con rapidez: *P. fuscatus* y *P. metricus* son especies muy cercanas y su último ancestro común habría poseído el sistema de reconocimiento facial, aún primitivo, de *P. metricus*. La adaptación biológica que perfeccionó el sistema habría surgido en *P. fuscatus* en tiempo reciente, después de que su linaje se separara del de *P. metricus*.

Una vez que la abeja ha aprendido a reconocer la vista frontal y lateral de una cara, puede identificar una imagen nueva de ese rostro girado 30 grados

Así que la próxima vez que salgamos al jardín, dediquemos unos minutos a observar las avispas y las abejas que habitan en él. Sus minúsculos cerebros discurren como nunca habíamos imaginado.

PARA SABER MÁS

Visual signals of individual identity in the wasp *Polistes fuscatus*. Elizabeth A. Tibbetts en *Proceedings of the Royal Society of London B*, vol. 269, págs. 1423-1428, julio de 2002.

Individual recognition: It is good to be different. Elizabeth A. Tibbetts y James Dale en *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 22, págs. 529-537, octubre de 2007.

Insect brains use image interpolation mechanisms to recognise rotated objects. Adrian G. Dyer y Quoc C. Vuong en *PLOS ONE*, vol. 3, n.º 12, art. e4086, diciembre de 2008.

Configural processing enables discrimination and categorization of face-like stimuli in honeybees. Aurore Avargues-Weber et al. en *Journal of Experimental Biology*, vol. 213, págs. 593-601, febrero de 2010.

Specialized face learning is associated with individual recognition in paper wasps. Michael J. Sheehan y Elizabeth A. Tibbetts en *Science*, vol. 334, págs. 1272-1275, diciembre de 2011.

EN NUESTRO ARCHIVO

Reconocimiento facial. N. Bublitz en *MyC* n.º 31, 2008.

Expertos en rostros. S. Höhl en *MyC* n.º 58, 2013.

MEDICINA

TERAPIA GÉNICA SEGUNDA PARTE

Una década y media después de los trágicos fracasos que llevaron a un replanteamiento de la técnica, esta se halla cada día más cerca de la aplicación clínica

Ricki Lewis

KOTRYNA ZUKAUSKAITE



Ricki Lewis, doctora en genética, es escritora científica. Es autora de numerosos artículos publicados en diversas revistas y de varios libros, entre ellos *The forever fix: Gene therapy and the boy who saved it* (St. Martin's Press, 2012).



La terapia génica parece cumplir, por fin, con sus expectativas. En los últimos seis años, los procedimientos experimentales destinados a introducir genes sanos en un determinado lugar del organismo han hecho recuperar la visión a 40 personas que sufrían un tipo de ceguera hereditaria. Los médicos han obtenido resultados sin precedentes en más de 120 pacientes con distintos tipos de leucemia; algunos de ellos no han sufrido recaídas en los tres años posteriores al tratamiento. La terapia génica ha permitido también que varios hombres con hemofilia, un trastorno hemorrágico que puede resultar mortal, permanezcan más tiempo sin presentar incidentes graves o sin necesitar dosis elevadas de fármacos anticoagulantes.

Los resultados positivos son incluso más impresionantes si se tiene en cuenta que la terapia génica se paralizó hace quince años tras la muerte prematura de Jesse Gelsinger, un adolescente que padecía un trastorno digestivo muy poco frecuente. Como consecuencia del tratamiento, su sistema inmunitario reaccionó con una intensidad desmesurada, lo que acabó con su vida. En los años noventa, los éxitos preliminares de la terapia génica habían generado, de modo infundado, altas expectativas entre los médicos y la comunidad científica.

Ese duro golpe, entre otros, forzó a los científicos a reconsiderar algunos aspectos y a ser más realistas con respecto a la viabilidad de la terapia génica en las enfermedades humanas. Tras ver reducidas sus esperanzas, decidieron retomar la investigación básica. Estudiaron los efectos adversos potencialmente mortales, como los sufridos por Gelsinger, y aprendieron a evitarlos. Además, dedicaron más atención a explicar los riesgos y las ventajas a los voluntarios y sus familias.

El punto de inflexión, según numerosos observadores, tuvo lugar seis años más tarde cuando los médicos trataron a Corey Haas, un niño de ocho años con un trastorno ocular degenerativo que le causaba el deterioro de la visión. La terapia génica permitió que la retina defectuosa del ojo izquierdo de Haas sintetizara una proteína que su organismo no podía producir. En cuatro días visitó el zoológico y, con gran asombro y agrado, pudo ver el sol y un globo aerostático. Tres años más tarde recibió el mismo tratamiento en el ojo derecho. Hoy ve lo suficientemente bien como para ir a cazar pavos con su abuelo.

Aunque la terapia génica todavía no se aplica en hospitales y centros sanitarios, la situación tal vez cambie durante la próxima década. En 2012, Europa autorizó el primer tratamiento para una afección muy poco frecuente, pero extremadamente dolorosa, denominada déficit familiar de lipoproteinlipasa. A finales de 2013, los Institutos Nacionales de Salud estadounidenses (NIH) decidieron eliminar ciertos obstáculos legales considerados innecesarios. Algunos analistas industriales estiman que en 2016 se comercializará el primer tratamiento génico en EE.UU. Tras una década perdida, el procedimiento está a punto de alcanzar su objetivo, el de convertirse en una estrategia médica revolucionaria.

DESENGAÑO

Los fracasos acaecidos en el ámbito de la terapia génica ponen de manifiesto la dificultad de crear una forma segura y eficaz para introducir genes en el tejido de interés. A menudo, los sistemas más seguros no resultaban eficaces, mientras que algunos de los más eficaces carecían de seguridad, ya que provocaban una respuesta inmunitaria desorbitada, como en el caso de Gelsinger, o el desarrollo de leucemia, efecto observado en otros pacientes.

EN SÍNTESIS

El entusiasmo inicial que suscitaron los experimentos de terapia génica en los años noventa dio lugar a expectativas poco realistas sobre la capacidad de la técnica en humanos.

Tras varios contratiempos trágicos, los investigadores emplearon los siguientes años en perfeccionar su conocimiento sobre la biología básica y los métodos empleados.

Actualmente, se dispone de tratamientos nuevos y más seguros que ya pueden trasladarse a la práctica clínica. Europa autorizó la primera terapia génica en 2012. Es posible que EE.UU. siga su ejemplo en 2016.

Con objeto de identificar la causa de tales efectos secundarios y reducir el riesgo de su aparición, los esfuerzos se centraron en el sistema de transporte más habitual en la terapia génica: virus modificados para que actúen como una pistola de inyección microscópica.

La técnica consiste, en primer lugar, en extraer algunos genes del virus y sustituirlos por los genes sanos que se desean introducir en el paciente. (Este paso presenta la ventaja añadida de evitar la multiplicación del virus dentro del organismo, lo que aumentaría el riesgo de reacción inmunitaria.) A continuación, se inyectan en el individuo los virus personalizados. Una vez allí, estos insertan los nuevos genes en diferentes lugares de la célula, en función del tipo de virus utilizado.

En el momento en que Gelsinger se presentó voluntario para un ensayo clínico, el sistema de transporte empleado eran adenovirus, unos microorganismos que, en su estado natural, causan infecciones leves de las vías respiratorias altas. Los científicos de la Universidad de Pensilvania optaron por inyectarlos en el hígado, donde se hallaban las células que sintetizaban la enzima digestiva necesitada. Integraron una copia activa del gen de esta enzima en adenovirus reducidos a su forma más sencilla. Posteriormente, inyectaron un billón de ellos, cada cual con su carga modificada, en el hígado de Gelsinger.

Sin embargo, una vez dentro del organismo, algunos virus se desviaron de su objetivo con trágicas consecuencias. Aunque alcanzaron las células hepáticas, infectaron también a una gran cantidad de macrófagos, un amplio grupo de células circulantes que actúan como centinelas del sistema inmunitario, así como a las células dendríticas, cuya función consiste en avisar en caso de invasión. El sistema inmunitario reaccionó eliminando todas las células infectadas, un proceso violento que destruyó el organismo de Gelsinger desde su interior.

La agresividad de la respuesta inmunitaria cogió a los investigadores por sorpresa. Ninguno de los 17 voluntarios sometidos previamente al tratamiento para el mismo trastorno había mostrado efectos secundarios tan graves. Se sabía que el adenovirus podía desencadenar una reacción inmunitaria, pero salvo un estudio en el que se empleó un virus genomanipulado algo distinto y en el que murió un mono, no se sospechaba que pudiera resultar tan virulenta. «Los humanos somos mucho más heterogéneos que las colonias de animales», afirma James Wilson, de la Universidad de Pensilvania, diseñador del vehículo vírico utilizado en el ensayo clínico en el que participó Gelsinger. «En el estudio observamos que una persona de entre 18 presentó una respuesta desmesurada.» A posteriori, parece que se debería haber inoculado una menor cantidad de virus genomanipulados en su organismo, miles de millones en lugar de un billón. Se criticó también a los investigadores por no informar al paciente y su familia del caso del fallecimiento del mono, lo cual les hubiera permitido valorar la posibilidad de que hubiera una conexión entre ambos casos.

La muerte de Gelsinger no fue la única tragedia. Poco después, el tratamiento de otro trastorno, denominado inmunodeficiencia combinada grave ligada al cromosoma X, causó cinco casos de leucemia y una defunción entre 20 niños. De nuevo, se atribuyó el fracaso al sistema de transporte de los genes. Sin embargo, en esta ocasión, la pistola de inyección consistió en un retrovirus, un tipo de virus que introduce su carga génica directamente en el ADN de la célula. No obstante, puesto que la localización de los genes terapéuticos es algo aleatoria, a veces el retrovirus insertaba su carga en un oncogén (gen que puede causar cáncer bajo ciertas circunstancias).

REPLANTEAMIENTO

Dada la propensión de los adenovirus a desencadenar reacciones inmunitarias mortales y de los retrovirus a provocar cáncer, los investigadores fijaron la atención en otros virus que pudieran ofrecer mejores resultados. Pronto se centraron en dos sistemas de transporte que consideraron más adecuados.

El primero, un virus adenoasociado (AAV), no causa ninguna enfermedad (a pesar de que la mayoría de las personas han sido infectadas por él en algún momento de su vida). Dado que se trata de un microorganismo muy corriente, resulta poco probable que desencadene reacciones inmunitarias agresivas. Otro de sus rasgos, que tal vez contribuya a reducir los efectos secundarios, es que presenta diferentes variedades, o serotipos, cada uno apropiado para un determinado tipo de célula o tejido. AAV2 resulta eficaz en el ojo, mientras que AAV8 prefiere el hígado y AAV9 se integra en los tejidos cardíaco y cerebral. Es posible seleccionar el AAV más adecuado para cada región del organismo, lo que reduce el número de virus necesarios y, por consiguiente, el riesgo de una respuesta inmunitaria desmesurada u otro tipo de reacción no deseada. Además, el AAV deposita su carga en el exterior de los cromosomas, por lo que no puede causar cáncer de forma accidental al no interaccionar con oncogenes.

Los virus adenoasociados se utilizaron por primera vez en un ensayo clínico llevado a cabo en 1996 sobre la fibrosis quística. Desde ese momento, se han identificado 11 serotipos y sus fragmentos se han mezclado y acoplado a fin de crear, mediante ingeniería genética, cientos de herramientas de transporte que parecen seguras y selectivas. En los estudios actuales, se investiga la eficacia de la terapia génica con AAV en diversas enfermedades neurológicas, como el párkinson y el alzhéimer, así como la hemofilia, la distrofia muscular, el infarto de miocardio y la ceguera.

El segundo vector génico, aún más sorprendente, corresponde a una versión modificada del VIH, el virus responsable

Continúa en la página 70

El desarrollo de una terapia génica óptima, que ya lleva varias décadas de recorrido, todavía no ha llegado a un fin. Pero los avances recientes han acercado esta estrategia al ámbito clínico para convertirse en el tratamiento principal de ciertos trastornos

Un abanico de estrategias

Los enfoques y tipos de virus empleados en la terapia génica varían según la enfermedad que se pretende tratar

RAMON ALEMANY

En la actualidad, la terapia génica se está aplicando de forma experimental para el tratamiento de todo tipo de dolencias. El abanico de indicaciones potenciales abarca desde enfermedades frecuentes como el cáncer y las afecciones cardiovasculares, hasta enfermedades infecciosas (sida), inflamatorias (artritis), o neurológicas (párkinson). No obstante, donde la terapia génica adquiere un mayor protagonismo es en los trastornos hereditarios monogénicos (causados por un solo gen), entre ellos la hemofilia, la fibrosis quística, la distrofia muscular de Duchenne o ciertas alteraciones del sistema inmunitario y del metabolismo.

En enfermedades causadas por la deficiencia de una proteína sanguínea que ejerce su función en todo el organismo, como la lipoproteinlipasa o los factores de coagulación, basta con modificar un número limitado de células de un órgano o tejido, como el hígado o el músculo, para que tales proteínas sean secretadas y se obtengan beneficios terapéuticos. Cuando la proteína que debe restablecerse no se secreta, sino que forma parte de las células, la mejoría dependerá del número de células del órgano afectado que logren corregirse. En determinadas deficiencias del sistema inmunitario, las células hematopoyéticas modificadas (algunas de las cuales darán lugar a células inmunitarias) sobreviven mejor que las no modificadas, por lo que se producirá un enriquecimiento progresivo de las primeras y se facilitará la curación.

La terapia génica resulta también muy atractiva cuando las células que deben corregirse se concentran en un tejido concreto. Tal es el caso de ciertas cegueras que afectan a la retina, como la amaurosis congénita de Leber. En cambio, en enfermedades en las que debe tratarse un enorme número de células y estas se distribuyen por todo el organismo, como en una distrofia muscular, la terapia génica plantea una enorme dificultad. Además, si el gen defectuoso afecta a numerosos tipos celulares o a células presentes en distintos tipos de tejidos, como en la fibrosis quística, el reto todavía es mayor.

Por último, aquellas dolencias causadas por múltiples factores (sean genéticos o no), que normalmente no son hereditarias, como las enfermedades neurodegenerativas (entre ellas, el párkinson) o las cardiovasculares, presentan la dificultad añadida de tener que encontrar el gen o los genes más adecuados para su tratamiento. En estos casos, la terapia génica busca la manera de paliar los síntomas clínicos más graves.

La ayuda de la terapia celular

La existencia de células madre o progenitoras capaces de diferenciarse en diversos tipos celulares y regenerar tejidos, bien conocida en el sistema hematopoyético, ofrece la posibilidad de modificar las células madre del paciente en cultivo (ex vivo) para luego implantarlas y generar tejidos sanos. Esta combinación de terapia génica con terapia celular está progresando con rapidez gracias a los avances logrados en el aislamiento de células madre con capacidad de regeneración tisular y en la reprogramación de células diferenciadas para obtener células madre [*véase* «El poder terapéutico de nuestras células», por Konrad Hochedlinger; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 2010]. Mientras que la manipulación genética de las células diferenciadas se pierde a medida que estas van siendo reemplazadas por otras nuevas en el tejido, la modificación de células madre asegura la persistencia a largo plazo del gen introducido. La modificación ex vivo de células madre resulta más sencilla que cuando la intervención se realiza directamente en el tejido del paciente (in vivo); otra de sus ventajas radica en que pueden seleccionarse, enriquecerse y multiplicarse después de ser corregidas genéticamente. La complementariedad entre la terapia génica y la celular ha llevado a la fusión de las sociedades que agrupan a los científicos de estas áreas. Ejemplo de ello ha sido la creación, en 2006, de la Sociedad Española de Terapia Génica y Celular.

Virus que transportan genes

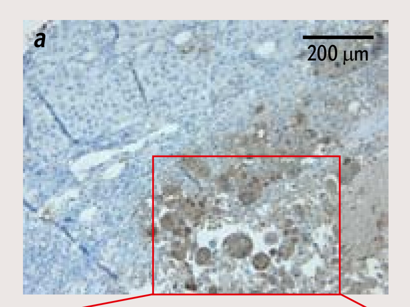
En la actualidad, los vectores derivados del virus del sida, los lentivirus, son los más utilizados para la modificación genética ex vivo, mientras que los derivados de virus adenoasociados (AAV) se emplean sobre todo en los procedimientos in vivo. Estos dos tipos de vectores son las herramientas que han hecho realidad la terapia génica.

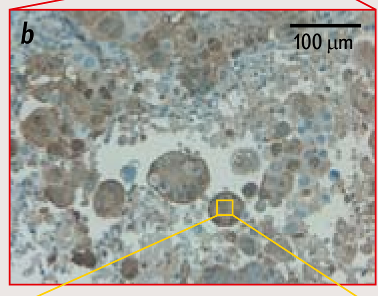
Una envuelta vírica, formada por una bicapa lipídica y un núcleo proteico en los lentivirus, o una cápside proteica en los AAV, encierra un pequeño fragmento de material genético (ARN en los lentivirus y ADN en los AAV). Este contiene las secuencias víricas necesarias para la replicación y encapsidación del virus, el gen terapéutico (que normalmente se limita a los exones que codifican la secuencia proteica) y las secuencias que regulan la expresión de este último. Los lentivirus y los AAV suelen causar una escasa reacción del sistema inmunitario.

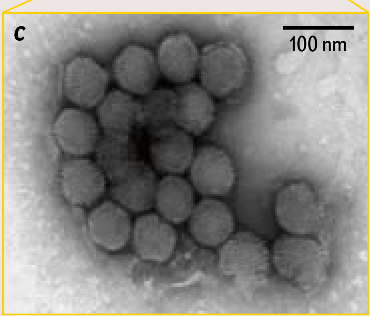
Además, la ausencia de genes víricos en los vectores derivados de ellos contribuye a su baja inmunogenicidad (la capacidad de provocar una respuesta inmunitaria), con lo que se evita el rechazo de las células modificadas genéticamente, o «transducidas». Sin embargo, en el caso del AAV se necesita inducir en el paciente una inmunodepresión transitoria durante la administración in vivo del vector. En las personas en las que el defecto genético heredado no es una mutación puntual o pequeña, sino que afecta a toda una proteína, el eventual rechazo de la célula corregida suele atribuirse más al gen terapéutico que al vector. Ello se debe a que la proteína codificada por ese gen resulta nueva para el paciente y su sistema inmunitario no la reco-

noce como propia. La baja inmunogenicidad del vector no solo reviste importancia porque asegura la eficacia a largo plazo de la terapia, sino también porque limita su toxicidad, sobre todo en el momento inmediatamente posterior a su administración. No obstante, la capacidad de transporte de material genético exógeno de lentivirus y AAV está limitada a 7,5 y 5 kilobases, respectivamente, lo cual impide la inserción de genes terapéuticos grandes, como el de la distrofina (cuya deficiencia causa distrofia muscular). Para paliar esta limitación se proponen distintas soluciones: usar versiones truncadas pero funcionales del gen terapéutico; dividir el gen en varios fragmentos que se enlazan en la célula modificada simultáneamente por varios lentivirus o AAV; emplear vectores no víricos basados en partículas sintéticas (nanopartículas); o, si el defecto genético es puntual, usar herramientas moleculares de reparación genética basadas en nucleasas (enzimas que se utilizan para escindir los ácidos nucleicos en puntos concretos).

El cáncer presenta características únicas, lo que determina la elección del tipo de vector para la terapia génica. Puesto que el objetivo es eliminar todas las células tumorales, la modificación genética de estas no tiene por qué ser permanente, sino que basta con que sea transitoria. A pesar de su mayor toxicidad, los vectores adenovíricos siguen siendo los más utilizados, debido a su mayor eficacia en la transducción in vivo de células epiteliales, origen de la mayoría de los tumores sólidos. Además, su mayor inmunogenicidad puede ayudar a revertir la inmunodepresión del paciente generada por los tumores. La necesidad de aumentar el número de células modificadas por el vector ha llevado al uso de vectores denominados oncolíticos por su capacidad de replicarse y destruir selectivamente las células tumorales. Tal estrategia supone una evolución de la idea, ya centenaria, de tratar el cáncer con virus, o viroterapia. Esta se ha transformado con el empleo de virus provistos de genes que promueven la citolisis tumoral, la propagación del virus o la generación de respuestas inmunitarias frente al tumor.







Una terapia génica contra el cáncer se basa en el uso de virus oncolíticos, como el adenovirus. Este se manipula genéticamente para que se replique dentro de las células tumorales y provoque su destrucción progresiva. En un melanoma de ratón, el virus causa una lisis o necrosis del tumor (*marrón*), una zona claramente diferenciada del resto del tejido (*azul*) (*a*). En ella se aprecian espacios sin células o grupos redondeados de células (*b*), los cuales contienen el virus (*c*).

ILUSTRACIONES CORTESÍA DEL AUTOR

La terapia génica en España

En nuestro país existen numerosos grupos especializados en terapia génica. En el Centro de Investigación Médica Aplicada de la Universidad de Navarra se investiga la terapia génica en enfermedades hepáticas de distinto origen, como la hepatitis vírica, la porfiria o el cáncer de hígado. En el caso de la porfiria, se está realizando un ensayo clínico con un vector híbrido AAV2 que contiene la cápside del AAV5 (AAV2/5). Para luchar contra el cáncer, se han realizado ensayos clínicos con adenovirus que expresan genes estimuladores del sistema inmunitario y se están desarrollando adenovirus oncolíticos armados con estos genes.

El Centro de Biotecnología Animal y Terapia Génica de la Universidad Autónoma de Barcelona está desarrollando terapias contra la diabetes y la mucopolisacaridosis III, o síndrome de Sanfilippo. Para los estudios sobre este último se cuenta con la colaboración de la empresa farmacéutica Esteve.

Asimismo, se está abordando la terapia génica de enfermedades hematológicas, como la anemia de Fanconi, la deficiencia en piruvato quinasa eritrocitaria o la deficiencia en adhesión leucocitaria de tipo I. Tales investigaciones se llevan a cabo en la Unidad Mixta de Terapia Celular del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas de Madrid y la Fundación Jiménez Díaz, en colaboración con el Centro de Investigación Biomédica en Red de Enfermedades Raras.

En el Instituto Catalán de Oncología se están desarrollando adenovirus oncolíticos. Se han iniciado ensayos clínicos con uno de ellos, el cual expresa un gen que facilita la diseminación intratumoral del virus.

Estos centros promueven el desarrollo de nuevos vectores de terapia génica mediante la creación de pequeñas compañías biotecnológicas, entre ellas Digna Biotech y VCN Biosciences, que buscan la financiación necesaria para el costoso desarrollo clínico. Existen también otros muchos grupos repartidos en universidades, hospitales y centros de investigación que, mediante la colaboración de investigadores básicos y clínicos, proponen nuevas estrategias. Sin embargo, en comparación con otros países europeos, la terapia génica no representa un área estratégica en los hospitales de referencia del país y la apuesta empresarial privada o la creación de empresas biotecnológicas resulta todavía muy escasa.

Ramon Alemany es investigador del Instituto Catalán de Oncología y del Instituto de Investigación Biomédica de Bellvitge. Además, es director científico de VCN Biosciences

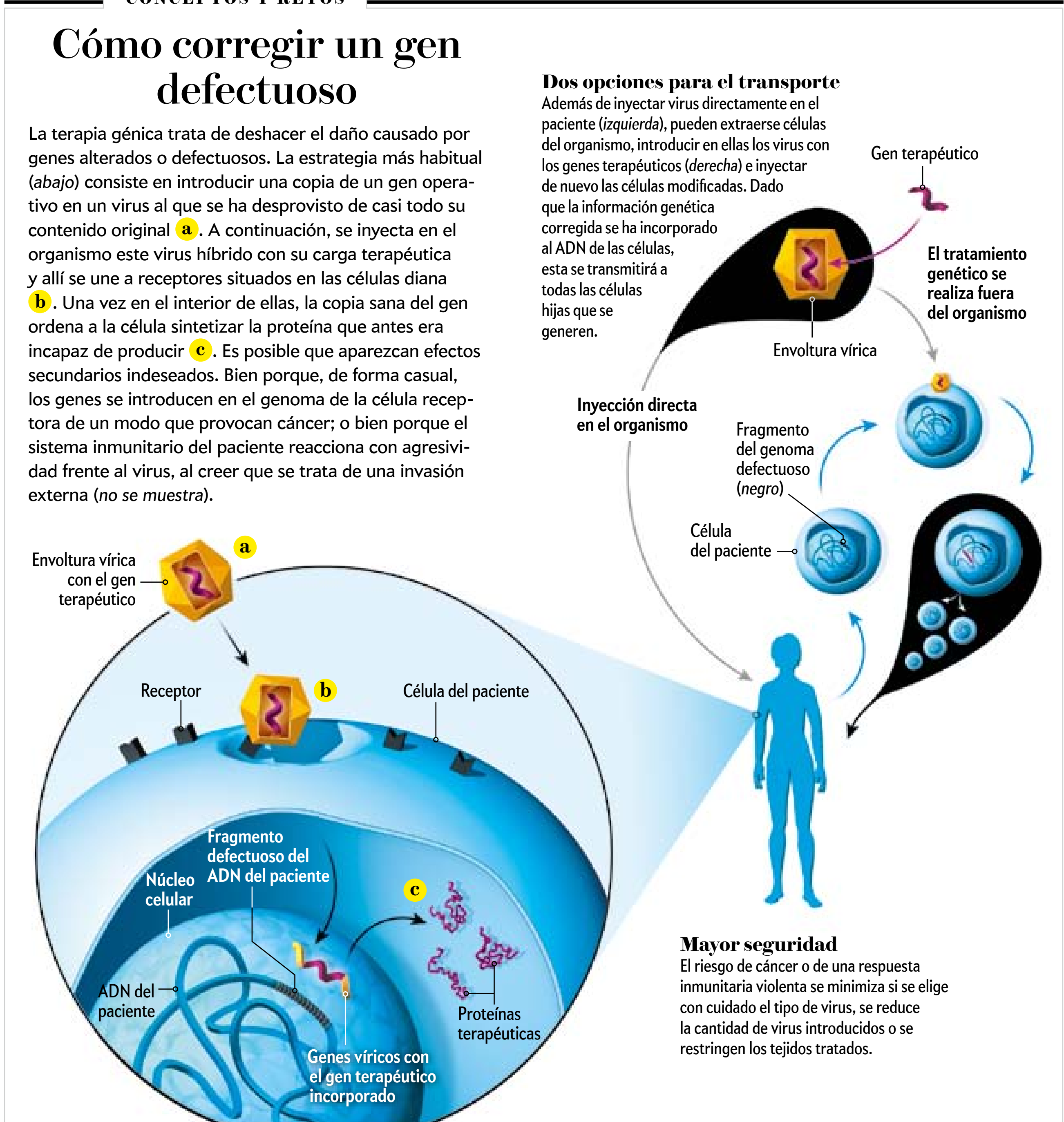
Viene de la página 67

del sida. Si se deja de lado su reputación de mortífero, afloran las ventajas de su empleo en la terapia génica. Como miembro del género *Lentivirus*, de la familia de los retrovirus, este microorganismo elude al sistema inmunitario; además, una de las características esenciales de esta familia radica en que no suele alterar los oncogenes.

Tras retirar los genes que confieren el carácter mortal al VIH, la envoltura vírica restante presenta un enorme potencial, afirma Stuart Naylor, exdirector científico de Oxford Biomedica en Inglaterra, empresa que desarrolla medicamentos basados en genes para trastornos visuales. Según Naylor, a diferencia del AAV, de menor tamaño, el VIH modificado es perfecto para transportar varios genes o genes voluminosos; no produce toxicidad ni reacciones inmunitarias adversas. En la actualidad, se utilizan lentivirus modificados en numerosos ensayos clínicos sobre diversas patologías, como la adrenoleucodistrofia, enfermedad caracterizada en la película *El aceite de la vida*, de 1992. Hasta la fecha, algunos de los niños que han recibido este tratamiento se han curado lo bastante como para poder acudir a la escuela.

A pesar del número creciente de ensayos clínicos con AAV y VIH, los investigadores han modificado también los antiguos vectores víricos para utilizarlos en determinadas circunstancias. De este modo, han genomanipulado retrovirus distintos del VIH para que se inactiven ellos mismos antes de que puedan provocar leucemia.

CONCEPTOS Y RETOS



TAMI TOLPA

Incluso el adenovirus, responsable de la muerte de Gelsinger, continúa en fase de investigación como vector para terapia génica. Se limita su uso en partes del organismo donde el riesgo de desencadenar una respuesta inmunitaria es mínimo. Una aplicación prometedora es el tratamiento de la sequedad de boca en pacientes con cáncer de cabeza y cuello que reciben radioterapia, la cual daña las glándulas salivales localizadas bajo la superficie interna de la mejilla.

Los NIH están llevando a cabo un pequeño ensayo clínico cuyo objetivo consiste en insertar un gen para crear canales que aportan agua a las glándulas. Dado el reducido tamaño de estas, su localización restringida y la menor cantidad de virus necesaria (mil veces menos que para Gelsinger), las posibilidades de una reacción inmunitaria agresiva son mínimas. Además, los virus que no alcanzan su objetivo deberían eliminarse por la saliva del paciente, ya sea deglutida o expulsada, con una posibilidad muy baja de perturbar el sistema inmunitario. Desde 2006, seis de once pacientes tratados produjeron una mayor cantidad de saliva. Bruce Braum, dentista y bioquímico responsable de la investigación, califica los resultados de prometedores, aunque muestra cierta cautela.

NUEVOS OBJETIVOS

Alentados por estos avances, los investigadores han dado un paso más y, además de tratar enfermedades hereditarias, se han propuesto eliminar el daño genético que se produce a lo largo de la vida. Un equipo de la Universidad de Pensilvania está aplicando la terapia génica para luchar contra un tipo de cáncer infantil frecuente conocido como leucemia linfoblástica aguda.

Aunque la mayoría de los niños afectados se benefician de la quimioterapia estándar, alrededor de un 20 por ciento no responde a ella. A estos últimos se les administra la terapia génica con objeto de activar sus células inmunitarias para que busquen y destruyan las células cancerosas resistentes al tratamiento.

La estrategia experimental, denominada técnica del receptor de antígenos quimérico (CAR, por sus siglas en inglés), es compleja. Igual que la quimera de la mitología griega, formada por varios animales, un receptor de antígeno quimérico está constituido por dos moléculas del sistema inmunitario que suelen presentarse juntas. Mediante vectores víricos, se equipa a algunos linfocitos T (un tipo de células inmunitarias) con estos receptores, lo que les permite localizar unas proteínas expresadas mayoritariamente en las células cancerosas. Estas últimas son destruidas a continuación por los linfocitos T. Los primeros individuos analizados fueron adultos con leucemia crónica, que mostraron una respuesta positiva. La siguiente prueba, realizada en una niña, superó los sueños más ambiciosos de los investigadores.

Emily Whitehead tenía cinco años de edad cuando, en mayo de 2010, le diagnosticaron una leucemia. Tras dos ciclos de quimioterapia se observó que la niña no respondía al tratamiento. En primavera de 2012 «recibió una [tercera] dosis de quimioterapia que hubiera matado a una persona adulta; pero, a pesar de ello, seguía presentando lesiones en los riñones, hígado y bazo», declara Bruce Levine, uno de los médicos de Whitehead. A la niña le quedaban días de vida.

Los médicos extrajeron una muestra de sangre de Whitehead y aislaron algunos de sus linfocitos T. Introdujeron en ellos lentivirus provistos de los genes que sintetizan los receptores quiméricos. A continuación, inyectaron las células modificadas a la niña. Tras un comienzo difícil, afortunadamente respondió al tratamiento y en poco tiempo mejoró. A las tres semanas, el 25 por ciento de los linfocitos T de la médula ósea presentaban la modificación genética. Estos empezaron a atacar a las células cancerosas, que pronto desaparecieron. «En abril estaba calva», recuerda Levine. «En agosto acudió al primer día de colegio, en el segundo curso de primaria.»

Cabe la posibilidad de que las células modificadas de Whitehead no duren eternamente, en cuyo caso puede repetirse el tratamiento. Lo esencial es que la niña lleva casi dos años sin cáncer. Y no es la única. A finales de 2013, varios grupos de investigadores notificaron el uso de la técnica de CAR en más de 120 pacientes con el mismo tipo de leucemia que Whitehead y otros tres tipos de cáncer de sangre. Cinco adultos y 19 de 22 niños lograron una remisión y en la actualidad no padecen cáncer.

APLICACIÓN CLÍNICA

Los especialistas en terapia génica, que ya cuentan con varios vectores víricos más seguros, afrontan ahora el gran reto que supone el diseño de un nuevo fármaco: recibir la autorización de la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos de EE.UU. (FDA). Para ello deben llevar a cabo ensayos clínicos de fase III para evaluar la eficacia del tratamiento en un grupo de voluntarios más amplio, lo que suele prolongarse entre uno y cinco años. A finales de 2013, el 5 por ciento de unos 2000 ensayos clínicos sobre terapia génica habían alcanzado la fase III. El objetivo de uno de los más avanzados fue la amaurosis congénita de Leber, la enfermedad que le estaba robando la vista a Haas. Hasta ahora, docenas de pacientes han recibido genes correctores en ambos ojos y, gracias a ello, pueden ver el mundo.

China fue el primer país en autorizar un tratamiento genético en 2004 para el cáncer de cabeza y cuello. En 2012, Europa aprobó un fármaco para terapia génica denominado Glybera, con el fin de tratar la deficiencia de lipoproteinlipasa hereditaria. A través de AVV, se inyectan en el músculo de la pierna copias corregidas del gen mutante. La empresa UniQure, con sede en los Países Bajos, mantiene conversaciones preliminares con la FDA para la autorización de este fármaco en los EE.UU. Un posible obstáculo radica en el precio: una sola dosis cuesta 1,16 millones de dólares. Sin embargo, si se desarrollaran procedimientos más eficaces, esta cifra podría reducirse.

Al igual que ocurre con numerosas técnicas médicas, el camino recorrido para desarrollar una terapia génica óptima ha durado décadas y ha sido enrevesado; además, aún queda mucho trabajo por hacer. No obstante, conforme el tratamiento vaya cosechando éxitos, como el caso de Corey Haas y Emily Whitehead, cada vez se hallará más cerca de convertirse en una estrategia principal para ciertos trastornos y una opción prometedora para otros.

PARA SABER MÁS

Gene therapy of inherited retinopathies: A long and successful road from viral vectors to patients. Pasqualina Colella y Alberto Auricchio en *Human Gene Therapy*, vol. 8, n.º 23, págs. 796-807, agosto de 2012. **www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22734691**.

Página web sobre terapia génica en los Institutos Nacionales de Salud: **ghr.nlm.nih.gov/handbook/therapy.**

EN NUESTRO ARCHIVO

Terapia génica. I. M. Verma en *IyC*, enero de 1991.

Avances en terapia génica. Informe especial. *IyC*, agosto de 1997.

Vectores víricos antitumorales. D. M. Nettelbeck y D. T. Curiel en *IyC*, enero de 2004.



Felix Arnold dirige el proyecto de investigación del Instituto Arqueológico Alemán sobre la almunia de al-Rummaniya. Su trabajo se centra en la arquitectura islámica y en las construcciones del Egipto faraónico.

Alberto Canto es profesor de arqueología medieval en la Universidad Autónoma de Madrid.

ARQUEOLOGÍA

Raíces musulmanas del Renacimiento

Al-Ándalus ejerció de puente entre la ciencia de la Antigüedad y la Italia del siglo XV. Según estudios recientes sobre la arquitectura de un jardín cordobés del siglo X, la nueva imagen del hombre que surgió durante el Renacimiento podría también tener bases islámicas

Felix Arnold y Alberto Canto

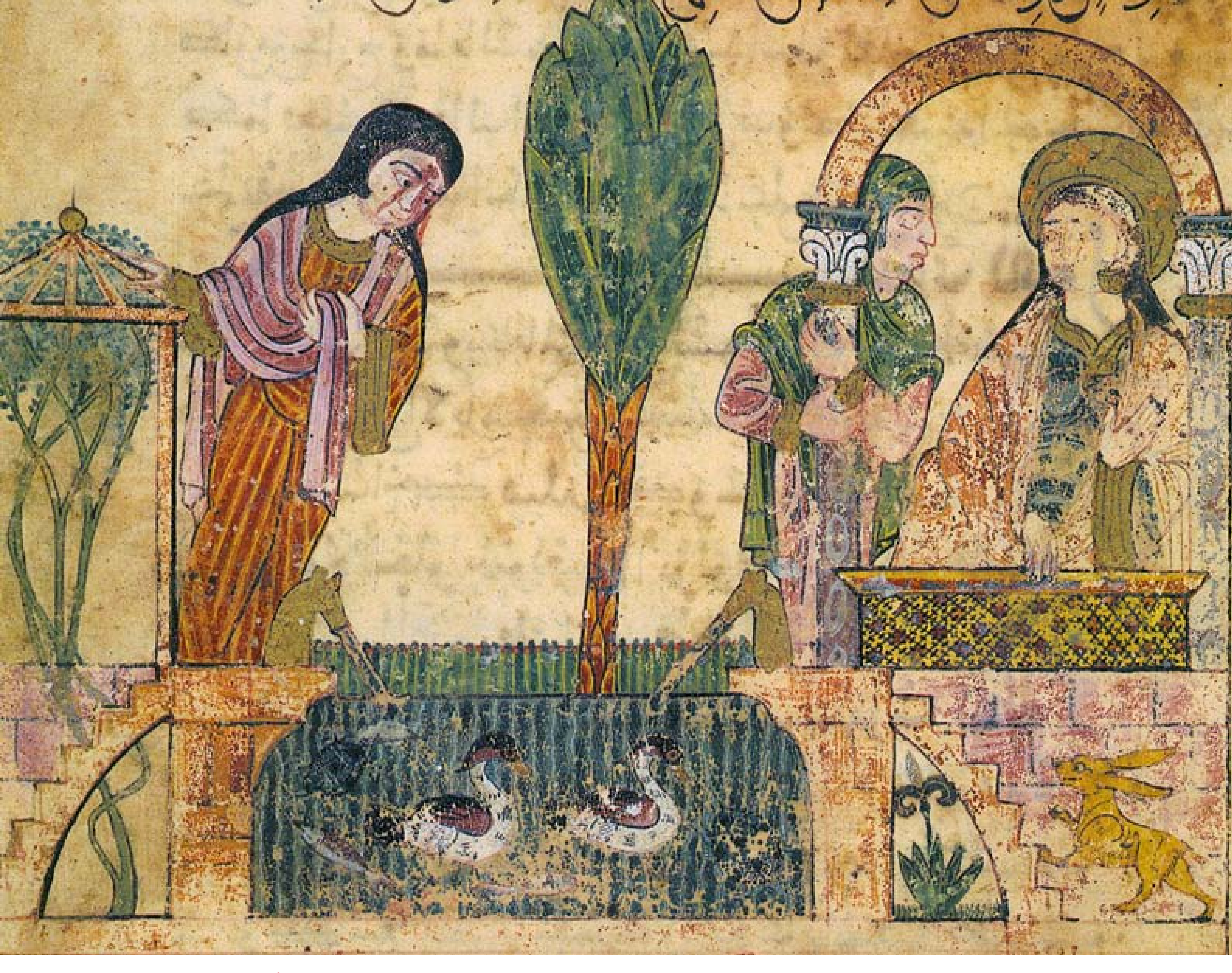
Cuando el monje Juan de Gorze llegó a Córdoba en el año 950 como delegado del rey de los francos orientales Otón I, se quedó ciertamente sorprendido. Amplias avenidas, algunas incluso pavimentadas, atravesaban la capital del reino musulmán de al-Ándalus; había baños públicos y una oficina de correos. A pesar de ello, a De Gorze no le agradó todo ese esplendor, pues lo identificaba con el paganismo y con una sensualidad reprobable. Al papa Silvestre II, en cambio, el estilo de vida oriental no le disuadió de visitar la península ibérica en el año 967 para estudiar los escritos de eruditos árabes sobre astronomía y matemáticas. Córdoba, en particular, guardaba un tesoro de más de diez mil manuscritos: una biblioteca que superaba con mucho a cualquier otra de Europa. En ella se conservaba el saber transmitido desde la Antigüedad, en su mayor parte en forma de traducciones árabes realizadas en Bagdad. Por este motivo, la ciudad atraía a sabios de todas las confesiones religiosas. En Córdoba estudiaron, entre otros, el filósofo musulmán Averroes y el médico judío Moisés Maimónides; las obras de Aristóteles llegaron a París a través de traducciones al latín, y Tomás de Aquino se basó en ellas para desarrollar la Escolástica, el germen de la filosofía moderna.

EN SÍNTESIS

La arquitectura musulmana de al-Ándalus pudo haber inspirado los jardines renacentistas del siglo XV. Ello implicaría una conexión entre ambas culturas más estrecha de lo que se pensaba.

Hasta ahora, esa hipótesis se apoyaba sobre todo en textos musulmanes, no en excavaciones arqueológicas, ya que numerosos jardines sufrieron modificaciones posteriores.

Desde 2006, los autores de este artículo investigan una finca de recreo del siglo X situada en los alrededores de Córdoba. Sus elementos arquitectónicos evocan tendencias renacentistas.



BIBLIOTECA APOSTÓLICA VATICANA, MS. VATICANO ARABO 368 (RISERVA), FOL. 13 RECTO

EN EL MUNDO ISLÁMICO los jardines se consideraban una representación del paraíso. El estudio de su diseño y arquitectura ha permitido establecer conexiones con la arquitectura renacentista.

El intercambio de conocimientos entre el mundo cristiano e islámico que tuvo lugar en Córdoba y, más tarde, en otras ciudades ya reconquistadas por príncipes cristianos, como Sevilla y Toledo, contribuyó de manera considerable al redescubrimiento del saber y el arte de la Antigüedad en la Italia renacentista del siglo xv. Sin embargo, la ciencia no fue la única que se benefició de aquel estrecho contacto. En la parte de la península ibérica que los árabes habían ocupado desde el año 711 prosperó también el arte de la jardinería, transmitido desde Oriente y el norte de África. En opinión de numerosos historiadores, esa circunstancia daría un impulso decisivo a los jardines renacentistas.

Los jardines solían formar parte de palacios, casas señoriales urbanas y villas suntuosas construidas en la periferia de las ciudades. Al igual que sucedía en Oriente, estaban compuestos por un conjunto de unidades independientes, de forma casi siempre cuadrada. Una particularidad del caso andalusí fue la arquitectura aterrazada, con la que se pretendía ampliar la vista hasta el horizonte.

Los escritores árabes no se cansaban de ensalzar los jardines de Córdoba. El historiador magrebí Ahmad al-Macara (1578-1632) describe al-Zagala, una joya situada al parecer delante de la puerta norte de la ciudad, de la siguiente manera: «Este jardín es uno de los lugares más espectaculares, hermosos y perfectos; un sinuoso riachuelo lo atraviesa como si de una serpiente se tratara; hay allí un estanque, donde confluyen las aguas. El tejado, las paredes y los muros del pabellón están decorados con oro y lapislázuli. En el jardín hay hileras de plantas dispuestas simétricamente, cuyas flores se abren como una sonrisa. El sol no puede tocar el suelo húmedo; la brisa esparce sus aromas noche y día, como si estuviera hecha de miradas enamoradas o como si se apartara de los días de su juventud» (*traducido por la arabista María Jesús Rubiera, de la Universidad de Alicante*).

Al lector moderno esa descripción le resultará familiar. Las «hileras de plantas dispuestas simétricamente» evocan el jardín barroco, mientras que el riachuelo probablemente recuerde a los jardines paisajísticos del modelo inglés. Simetrías, distribución del espacio en terrazas subdivididas, corrientes de agua y estanques: todos estos elementos pasarían más tarde a formar parte del canon de los jardines renacentistas. Por ello, los historiadores consideran que tales elementos e ideas podrían haberse transmitido a través de al-Ándalus.

Por desgracia, casi todos los testimonios de los que disponemos son aportaciones literarias como la citada. De los otrora exuberantes jardines de Córdoba solo se ha conservado como conjunto arqueológico el que formaba parte de Madinat al-Zahra (Medina Azahara), la ciudad palatina del califa. En el centro de una superficie casi cuadrada, cuyos lados medían 150 metros, se alzaba un pabellón rodeado de cuatro albercas. Otros tantos andenes acompañados de canales de piedra partían hacia los cuatro puntos cardinales, formando una cruz de grandes dimensiones. Este motivo se conoce en Persia como *chahar bagh*, «jardín dividido en cuatro partes».

Hoy en día no es posible saber si aquellas hileras de plantas dispuestas de modo simétrico realmente sorprendían al espectador, ya que, por desgracia, la zona fue desescombrada en los años cuarenta del siglo pasado. En esa etapa temprana de la arqueología española, aún no se disponía de las posibilidades que hoy ofrece la arqueobotánica para identificar, mediante estudios microscópicos, pequeños restos vegetales. Y semejante estudio es ahora inviable, ya que la zona ha sido repoblada y la contaminación ha borrado cualquier vestigio posible.

Tampoco el conocido «jardín musulmán» del Alcázar de Sevilla permite inferir con claridad qué aromas envolvían a los visitantes ni si las corrientes de agua estaban diseñadas según un modelo natural o a modo de canal. Los jardines del siglo xi fueron remodelados a partir de finales de la Edad Media, es decir, del siglo xiii en adelante, por lo que resulta imposible responder a tales preguntas. Los de la Alhambra de Granada, tan admirados hoy por los turistas, se construyeron en esa época, por lo que reflejan las costumbres de una al-Ándalus posterior.

En otoño de 2006, los autores de este artículo, en colaboración con Antonio Vallejo, director del conjunto arquitectónico de Madinat al-Zahra, decidimos explorar otro jardín. Situado unos diez kilómetros al oeste de Córdoba, de él se habían conservado intactas bastantes zonas, por cuanto allí no se efectuaron intervenciones posteriores que hubieran podido alterar su estado. En 1910, el arquitecto e historiador español Ricardo Velázquez Bosco había explorado ya la almunia. Entre otros hallazgos, descubrió partes de la decoración de mármol que hoy en día pueden verse en el Museo de Córdoba. Entre 1926 y 1931, el marqués de Murrieta —viticultor cuyos viñedos siguen siendo, aún hoy, unos de los más importantes de La Rioja— construyó una residencia de verano en la finca. El terreno, abandonado por completo, se emplea en la actualidad para la cría de toros de lidia.

La finca de recreo, construida en la ladera sur de Sierra Morena, aparece en las fuentes escritas con el nombre de Munyat al-Rummaniya, «la villa del valle de los granados». En su día ocupaba cuatro terrazas, de 150 metros de ancho y 50 metros de fondo cada una; de ellas tres albergaban jardines, con una diferencia de altura entre los distintos niveles de unos tres metros. En la terraza superior se encontraban la zona de recepción y los edificios destinados a viviendas. Allí había también una alberca de grandes dimensiones que recogía y almacenaba el agua de la lluvia.

El propietario de la villa fue al-Durri *el Pequeño*, ministro de finanzas del califa al-Hakam II (915-976). Miembro de una familia muy influyente, desempeñó enseguida cargos de gran relevancia. A partir de 965 invirtió su patrimonio en la construcción de la almunia, de la que, sin embargo, no pudo disfrutar muchos años. En abril de 973 cayó en desgracia, acusado de haber malversado dinero público. Al final, el conflicto se solucionó de mutuo acuerdo: al-Durri regaló la villa a su señor y, con tal motivo, organizó una gran fiesta. Tras la muerte del califa, el ministro fue víctima de una intriga palaciega y murió mientras intentaba huir.

HITO ARQUITECTÓNICO

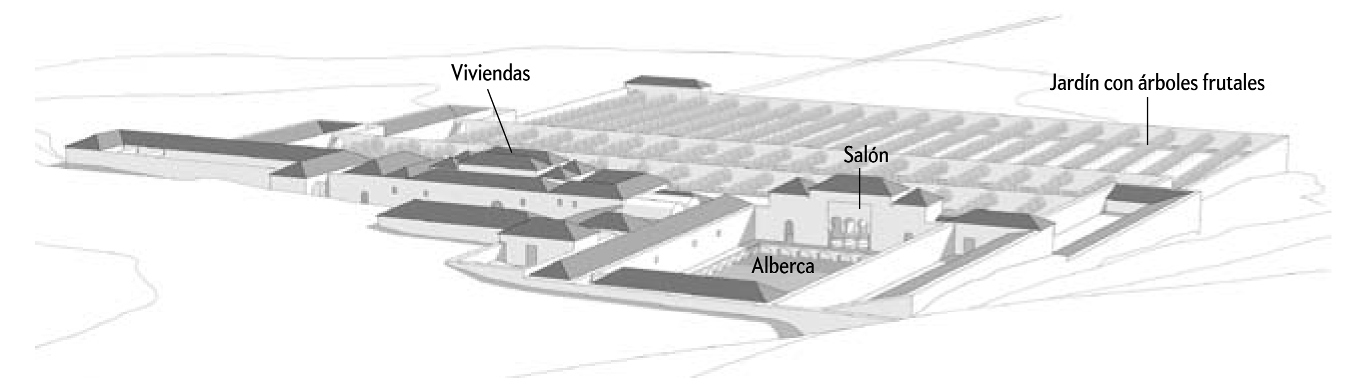
Hasta ahora, la investigación arqueológica se había centrado en las construcciones de representación y residenciales de la terraza superior, así como en el sistema hidráulico general. Para comenzar nuestro estudio procedimos a documentar las ruinas visibles, cubiertas de maleza. Las partes de algunos edificios aún sobresalen unos cuatro metros. Un tramo del muro exterior, que rodeaba todo el recinto, se ha conservado en bastante buen estado. Puede verse que, fuera quien fuese su arquitecto, le gustaba experimentar: diseñó un entramado a modo de celosía, con bloques de piedra caliza rellenos de barro.

La alberca fue, sin duda, un hito arquitectónico. Con 50 metros de largo, casi 30 de ancho y 4 metros de profundidad, era



JOHN PATTERSON, INSTITUTO ARQUEOLÓGICO ALEMÁN DE MADRID

RESTOS DEL COMPLEJO DE MUNYAT AL-RUMMANIYA, donde aún puede verse un tramo del muro que rodeaba el recinto. El terreno se emplea en la actualidad para la cría de toros de lidia.



DONDE HOY EN DÍA PASTAN TOROS DE LIDIA se extendía en el siglo x la finca de recreo al-Rummaniya (*reconstrucción*). Los análisis arqueobotánicos han revelado que a al-Durri, propietario de la finca y ministro de Finanzas en el califato de Córdoba, no le interesaban demasiado las flores, ya que en tres de las cuatro terrazas se cultivaban árboles frutales.

FELIX ARNOLD, INSTITUTO ARQUEOLÓGICO ALEMÁN DE MADRID

una de las mayores del mundo islámico de aquel entonces. Los operarios encargados de su construcción aseguraron el hoyo con un muro de mampostería, el cual impermeabilizaron con un enlucido de cal que luego pulieron. Los pilares que sobresalían del interior de la alberca sostenían un pavimento de losas; sin duda, una solución muy ingeniosa para contemplar los peces mientras se caminaba sobre el agua. Parece probable que el andén también permitiese a los animales protegerse del sol, ya que no había vegetación alguna.

El sistema de abastecimiento de agua de la alberca y la zona residencial anexa nos sorprendió. Aunque numerosas estructuras de ese tipo ya habían sido ideadas por los romanos, aquella combinación de técnicas para obtener agua, almacenarla y distribuirla revelaba un gran dominio por parte del arquitecto. El agua, que durante las intensas lluvias del invierno fluía por el arroyo, era desviada con gran habilidad hasta la alberca. Es posible que para ello se construyera un muro de contención río arriba y una canalización. Además, las paredes de los pozos de la zona se aseguraron con muros de piedra, a fin de poder extraer agua de ellos. También se construyó una galería de desagüe bajo tierra: un pozo horizontal que acarreaba el agua subterránea de las montañas próximas.

Mientras que la cisterna suministraba agua potable, el agua de la alberca estaba destinada a las plantas y a refrescar el ambiente del salón construido entre el estanque y las terrazas ajardinadas inferiores. El agua mantiene su temperatura durante más tiempo que la tierra o la piedra, por lo que, en los días calurosos, se generaba una agradable corriente de aire de la que se beneficiaban los ocupantes del salón, abierto al exterior a través de unas arcadas.

Entre 2008 y 2009 estudiamos por primera vez la vegetación con técnicas arqueobotánicas. La tierra obtenida en los cortes de la excavación se preparó por lavado, a fin de que nuestros colaboradores de la Universidad de Jaén pudieran identificar los restos vegetales. La terraza situada directamente bajo el conjunto de edificaciones proporcionó resultados de gran interés. Como la zona residencial fue derruida durante una guerra civil en el año 1009, los escombros sellaron el suelo, gracias a lo cual la tierra original se preservó durante siglos.

Para nuestra sorpresa, esa tierra no contenía rastros de lirios, rosas, margaritas, violetas o jacintos, ni tampoco vestigios de ninguna otra planta decorativa como las que, según los cronistas árabes, se cultivaban en aquellos jardines. Aquella parte, donde por su cercanía a los habitantes de la villa habría cabido esperar todas las características de un jardín ornamental, había estado cubierta por un olivar. Nuestros colaboradores descubrieron además indicios de otros árboles frutales, como almendros, ciruelos y guindos, si bien ningún rastro de granados, el árbol que daba nombre a la región. Según el estado actual de la investigación, se trataría más de una plantación que de un jardín ornamental.

Los jardines renacentistas de Florencia respondían a una nueva imagen del ser humano: una que concedía al individuo un espacio que, durante la Edad Media, le había estado vedado como consecuencia de una religiosidad muy estricta

Por tanto, desde ella no llegarían aromas delicados hasta los visitantes, sino olor a tierra. Este hallazgo concuerda también con el hecho de que, al parecer, no había caminos pavimentados para pasear.

Semejante conclusión queda confirmada por las descripciones sobre la residencia de al-Durri que han llegado hasta nosotros, las cuales no mencionan flores. Lo que tantas veces había irritado a los historiadores de los jardines al analizar los textos sobre los paraísos terrenales queda así convertido en una realidad histórica. Lamentablemente, no hay posibilidad de compararlos con otros jardines de la época, si bien lo más probable es que existieran diferentes tipos de haciendas.

Por otro lado, Al-Rummaniya tampoco contradice la hipótesis de la influencia andalusí en los jardines del Renacimiento. Los jardines de los alrededores de Florencia muestran llamativas semejanzas, sobre todo los más antiguos. La poderosa e influ-

yente familia Médici prefirió también lugares en pendiente para disponer en ellos varias terrazas. Y, en los primeros intentos por conseguir una imagen armónica que reflejara el nuevo ideal de belleza basado en la Antigüedad clásica, las flores no desempeñaban ningún papel especial.

DE CÓRDOBA A FLORENCIA

Sin embargo, entre la Córdoba del siglo X y la Florencia del XV median cinco siglos, por no hablar de la distancia geográfica. Hasta donde sabemos, ningún arquitecto florentino vio jamás un jardín andalusí. Una posible influencia musulmana implica, por tanto, toda una serie de estadios intermedios que expliquen la transmisión de conocimientos de una cultura a otra. A ellos pertenecen, por ejemplo, los jardines reales de Palma de Mallorca de principios del siglo XIII; es decir, poco después de la reconquista de la ciudad por las tropas cristianas, pero todavía bajo una clara influencia musulmana. Tampoco las ciudades de Toledo, Sevilla y Córdoba, que fueron reconquistadas en los siglos XIII y XIV, tiraron por la borda la tradición árabe; en su lugar, le confirieron una interpretación cristiana. Para ello no faltaron aspectos en los que apoyarse, como la citada cruz que formaban los andenes de Madinat al-Zahra, imitada en los claustros de los monasterios. El trasfondo cultural de este jardín de crucero lo hallamos en que ambas religiones comparten la idea de un paraíso desde cuyo punto central parten ríos hacia los cuatro puntos cardinales. Por otro lado, la reconquista de la España musulmana por parte los ejércitos cristianos no finalizó hasta 1492. En Granada, por ejemplo, hubo jardines árabes contemporáneos a los de los Médici.





ESTADO ACTUAL del muro de la gran alberca de la finca de al-Rummaniya. Los pilares que sobresalían del interior de la alberca sostenían un pavimento de losas (*arriba*). Reconstrucción de la vista que ofrecía el complejo, desde la alberca hacia el salón (*abajo*).

JOHN PATTERSON, INSTITUTO ARQUEOLÓGICO ALEMÁN DE MADRID (*fotografía*); FELIX ARNOLD, INSTITUTO ARQUEOLÓGICO ALEMÁN DE MADRID (*reconstrucción*)

Similitudes formales aparte, también es posible que existiese cierto parentesco espiritual que explicase que una cultura de marcado corte oriental sirviese de modelo a la evolución europea. Los jardines de Florencia, por ejemplo, expresaban una nueva imagen del ser humano: una que concedía al individuo un espacio que, durante la Edad Media, le había estado vedado como consecuencia de una religiosidad muy estricta. En los nuevos jardines, la élite florentina buscaba una armonía interior, un acercamiento a la naturaleza y un equilibrio entre la vida de la ciudad y la —sin duda idealizada— vida en el campo.

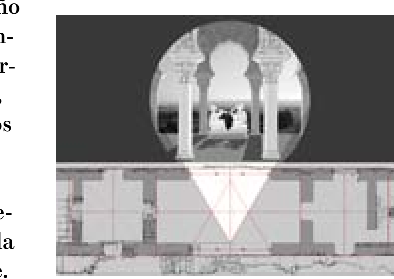
Las villas residenciales de Córdoba surgen como resultado de un fenómeno muy similar. En los textos no solo se describen como espacios de ocio a los que sus dueños se retiraban durante el verano para huir del calor de la ciudad, sino también como lugares donde los combatientes podían recuperar fuerzas tras una campaña militar. En estas fincas de recreo se celebraban asimismo importantes actos sociales, como bodas o ceremonias de circuncisión. En medio de una naturaleza controlada y debidamente estructurada, se hacía también, por supuesto, política, por lo que en modo alguno podían faltar edificios de representación. También en este aspecto, los jardines árabes guardan semejanzas con los de Florencia y Roma.

A este concepto arquitectónico pertenece el salón que en al-Rummaniya se alza junto a la gran alberca. En 2006 descubrimos ya los primeros indicios; en las campañas de 2008 y 2009 conseguimos definir la planta, a lo que se añadió el hallazgo de partes del tejado y de fragmentos de mármol de la decoración. De acuerdo con estos estudios, las arcadas estaban decoradas con imágenes en relieve y reproducciones plásticas de plantas (hojas de acanto, vides y granadas) y de animales (aves, pero también leones y gacelas). Siguiendo fielmente la tradición de los jardines islámicos, a través de la fusión de la arquitectura y el paisaje se evocaba la imagen del paraíso.

CONOCIMIENTO DE LA PERSPECTIVA

Pero las arcadas tal vez revelen más aspectos sobre la forma de pensar de la élite de la época. El salón se abría hacia el norte, en dirección a la alberca y las montañas, a través de una arcada. Una segunda daba al sur; esto es, a las terrazas ajardinadas y a la extensa llanura del Guadalquivir. La planta parece indicar que ambas seguían un patrón geométrico: un triángulo equilátero cuyo vértice se encontraba situado en el centro de la pared posterior del salón. Los ángulos de un triángulo equilátero miden 60 grados. A cualquier arquitecto, pintor o fotógrafo le llamará la atención ese dato, pues coincide con bastante exactitud con el ángulo visual de una persona que

EL ARQUITECTO de la finca de al-Rummaniya se esforzó por armonizar el alma del espectador con el paisaje. El punto culminante de su obra se encuentra en el conjunto formado por una alberca y un salón de fiestas anexo. La primera suministraba agua a las terrazas ajardinadas inferiores y refrescaba el ambiente. Sorprendentemente, las arcadas del salón enmarcaban el campo de visión natural del espectador (*abajo*). Sin embargo, este diseño presuponía conocimientos que, según los expertos en historia del arte, no nacieron hasta siglos después, en los albores del Renacimiento. La reconstrucción de la derecha muestra la arcada abierta hacia el paisaje.





FELIX ARNOLD

mira sin mover la cabeza. En pintura debe tenerse en cuenta este aspecto para reproducir la perspectiva; de lo contrario, las imágenes resultan deformadas.

¿Es posible que los arquitectos de al-Rummaniya tuvieran conocimiento de la perspectiva? El matemático y astrónomo al-Haytham (965-1040), conocido en Occidente como Alhazen o Alhacén, hizo sus descubrimientos más importantes en El Cairo, durante su estancia en la corte de los fatimidas. En su obra *Kitab al-manazir* describe principios ópticos como los mencionados. Traducida al latín a finales del siglo XII con los títulos *De aspectibus* y *Opticae thesaurus*, la obra sirvió de inspiración a los estudiosos europeos y preparó el camino para la representación de la perspectiva en el Renacimiento. La ruptura con las ideas de la Antigüedad sobre la luz y la visión se sigue considerando, todavía hoy, la contribución más meritoria del genial investigador [*véase* «Los orígenes del telescopio», por Sven Dupré; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 2009]. Sin embargo, la obra de Alhacén fue escrita décadas después de la construcción del mencionado jardín.

Parece probable que Alhacén aprovechase las corrientes de su época y los trabajos de eruditos árabes anteriores, como el matemático al-Maslama, que desarrolló su actividad en la Córdoba del siglo X y se dedicó fundamentalmente al estudio de la geometría. Aunque se trata de una mera especulación, el hallazgo de al-Rummaniya parece indicar que no fue Alhacén el primero en reconocer la limitación del campo de visión del ojo humano. Se diría que el arquitecto incluyó este aspecto en la edificación, ya que las arcadas proporcionan al espectador un marco fijo que le permite deleitarse en la contemplación del paisaje. En un edificio renacentista no se pondría en duda que tal era la intención del arquitecto.

En su obra *Florencia y Bagdad: Una historia de la mirada entre Oriente y Occidente*, el historiador del arte Hans Belting defiende que, si bien la cultura islámica fue la primera que definió correctamente los principios de la óptica, no los aplicó al arte, pues ello exigiría postular la presencia de un espectador del espacio. Tanto Belting como otros expertos consideran este paso como la característica esencial del Renacimiento, estrechamente ligada a la imagen del ser humano vigente en la época. Sin embargo, sin la presencia de una persona que observara el paisaje desde el salón, las arcadas de al-Rummaniya carecen de sentido, pues solo desde un punto exacto del recinto enmarcan con exactitud el campo visual.

Por tanto, puede que la residencia de al-Durri no se limitase a ser un elemento precursor de los jardines del Renacimiento. Su arquitectura habría anticipado también una nueva valoración del individuo. Pero, en tal caso, ¿no tendría que haber surgido en Córdoba un Renacimiento islámico? Tanto más cuanto los principios de diseño que hemos mencionado también se aplicaron en el siglo XI en otros lugares, como el Palacio de la Aljafería de Zaragoza y la Alcazaba de Almería, donde las arcadas escalonadas orientaban la mirada hacia el jardín.

Tal vez en aquella época la cultura no hubiese madurado lo suficiente para dar lugar a una evolución como la apuntada aquí. Hacia el cambio de milenio se agudizaron los conflictos étnicos en al-Ándalus entre la población autóctona, los emigrantes del norte de África y los esclavos importados de Europa. En 1009 estalló la guerra civil mencionada más arriba, en la que extensas zonas de Córdoba fueron destruidas y abandonadas. También al-Rummaniya fue víctima de un incendio. Eruditos y artistas abandonaron la ciudad y buscaron refugio en las cortes de señores regionales que ya no estaban controlados por ningún poder central —los reyes taifas— en Sevilla, Valencia, Almería y Toledo, entre otros lugares.

En estos reinos volvió a florecer una cultura palaciega, pero las dinastías almorávide y almohade, originarias del norte de África y de orientación fundamentalista, la encontraron decadente, cuando no antiislámica, y, poco a poco, fue relegada al olvido. De este modo, la auténtica beneficiaria de las conquistas culturales de Córdoba habría sido Europa occidental. Toledo, uno de los centros de la cultura musulmana, fue reconquistado por las tropas cristianas de Castilla en 1085. Muy pronto se convertiría en un centro de comunicaciones por el que intelectuales, artesanos y artistas árabes se abrieron camino hacia la sociedad cristiana.

PARA SABER MÁS

Maurische architektur in Andalusien. M. Barrucand y A. Bednorz. Taschen, 1991.

Gardens, landscape and vision in the palaces of islamic Spain. D. Fairchild Ruggles. Penn State Press, 2000.

Florencia y Bagdad: Una historia de la mirada entre Oriente y Occidente. Hans Belting. Akal, 2012

Ar-Rummaniya: Ein islamischer Landsitz bei Córdoba. Dirigido por F. Arnold et al. en *Madrider Beiträge*, n.º 34, 2013.



PSICOLOGÍA

¿Por qué las buenas ideas bloquean otras mejores?

Al enfrentarnos a un problema, un sesgo cognitivo nos empuja a centrarnos en las soluciones que ya conocemos y, literalmente, nos impide ver las alternativas

Merim Bilalić y Peter McLeod

DANNY SCHWARTZ

Merim Bilalić es profesor de ciencia cognitiva de la Universidad de Klagenfurt e investigador en la Universidad de Tubinga. Sus estudios sobre el efecto *Einstellung* merecieron en 2008 el premio que cada año concede la Sociedad Británica de Psicología a la mejor investigación doctoral en la disciplina.



Peter McLeod es profesor emérito del Queen's College de la Universidad de Oxford y presidente de la Fundación Oxford para la Neurociencia Teórica y la Inteligencia Artificial.



En 1942, el psicólogo Abraham Luchins llevó a cabo un experimento, hoy ya clásico, en el que pidió a un conjunto de voluntarios resolver un problema matemático sencillo. En él los participantes debían imaginar tres jarras vacías, con capacidades para 21, 127 y 3 unidades de líquido, respectivamente, y encontrar la manera de medir 100 unidades transfiriendo agua de un recipiente a otro. Cada jarra podía llenarse y vaciarse tantas veces como desearan, pero, en caso de verter agua en ellas, esta debería siempre alcanzar los bordes. La solución consiste en llenar la segunda jarra (de 127 unidades), vaciar luego parte de su contenido en la primera (de 21 unidades), a fin de que queden 106, y, por último, llenar dos veces la tercera (de 3 unidades). Acto seguido, Luchins les propuso otros problemas que, en esencia, podían resolverse en los mismos tres pasos. Los sujetos lo lograron con rapidez. Sin embargo, cuando se les planteó una situación que admitía una solución más simple que las anteriores, no supieron verla.

En aquel caso Luchins pidió a los participantes que obtuvieran 20 unidades de agua usando jarras de 23, 49 y 3 unidades de capacidad. ¿Sencillo, verdad? Basta con llenar el primer recipiente y, con ese líquido, colmar el tercero. Sin embargo, muchos insistieron en resolver el problema con el método anterior; es decir, vertiendo el agua del segundo recipiente en el primero y después en el tercero dos veces. Por último, cuando Luchins les propuso otro problema que también podía resolverse en dos pasos pero que, en cambio, no admitía la familiar solución en tres etapas, los participantes lo dejaron por imposible.

El experimento descrito constituye uno de los ejemplos más famosos del efecto *Einstellung* («de focalización»): la obstinada tendencia del cerebro humano a aferrarse a la solución más conocida —la primera que llega a la mente— y a hacer caso omiso de las alternativas. Con frecuencia, esa manera de reaccionar nos proporciona una heurística útil: una vez que hemos dado con un método eficaz para, pongamos por caso, pelar ajos, no tiene mucho sentido ensayar nuevas técnicas cada vez que hemos de mondar un diente. En ocasiones, sin embargo, este atajo cognitivo nos impide ver soluciones más eficientes que las que ya conocemos.

Desde los primeros trabajos de Luchins, el efecto *Einstellung* se ha observado en múltiples estudios de laboratorio, con todo tipo de destrezas mentales y tanto con principiantes como con expertos. No obstante, hasta ahora se desconocía cómo y por qué se producía. Con el objetivo de estudiar el fenómeno, hace unos años decidimos estudiar los movimientos oculares de jugadores de ajedrez expertos. Nuestros resultados mostraron que, cuando un sujeto se encuentra bajo la influencia de este atajo cognitivo, queda literalmente cegado ante los detalles de su entorno que, de otro modo, le habrían guiado hacia una solución mejor. Por otro lado, varias investigaciones recientes parecen sugerir que buena parte de los sesgos cognitivos conocidos —como los que se han observado en juicios o en la práctica de la profesión médica— no serían sino variaciones del efecto *Einstellung*.

VOLVER A LA CASILLA DE SALIDA

Al menos desde principios de los años noventa del siglo xx, los psicólogos han estudiado el efecto *Einstellung* en jugadores de ajedrez de distintos niveles, desde aficionados hasta grandes maestros. A tal fin, se les presenta un tablero de ajedrez con una posición específica y se les pide que encuentren la manera de dar mate en el menor número de movimientos posible. En nuestros experimentos les propusimos situaciones que podían resolverse mediante el «mate de la coz», una combinación estándar de cinco movimientos muy conocida entre los jugadores de ajedrez. La maniobra implica sacrificar la dama, a fin de que una de las piezas del contrincante bloquee la vía de escape del rey, que queda atrapado en una esquina del tablero. Después, el mate lo da un caballo. Sin embargo, en la posición escogida

EN SÍNTESIS

El efecto *Einstellung* se define como el sesgo cognitivo por el que, al enfrentarnos a un problema, solo tenemos en cuenta las soluciones conocidas y renunciamos a explorar ideas alternativas.

Los psicólogos vienen documentando esa clase de comportamiento desde los años cuarenta del pasado siglo. Sin embargo, hasta ahora no se sabía con certeza qué mecanismos lo impulsaban.

Al estudiar los movimientos oculares de jugadores de ajedrez, varias investigaciones recientes han comprobado que las soluciones preconcebidas desvían la vista de otras áreas del tablero.

existía una secuencia alternativa que, aunque menos familiar, permitía ganar en tan solo tres jugadas. Al igual que ocurrió con las jarras de agua de Luchins, la mayoría de los jugadores no supo ver la segunda opción.

En algunos casos preguntamos a los participantes qué se les había pasado por la cabeza durante el ejercicio. Dijeron haber visto el mate de la coz y nos aseguraron que, a pesar de ello, habían intentado encontrar una variante ganadora más corta. Sus testimonios no nos ofrecían ninguna pista acerca de por qué no habían visto la solución más rápida, por lo que en 2007 decidimos recurrir a un método más objetivo: grabar sus movimientos oculares con una cámara de infrarrojos. De esta manera, al estudiar qué regiones del tablero miraban y cuánto tiempo se detenían en cada una, podríamos inferir en qué aspectos del problema se habían fijado y en cuáles no.

En el experimento seguimos la mirada de cinco jugadores expertos mientras examinaban una posición que podía resolverse de las dos maneras: en cinco movimientos con el mate de la coz, y en tres con una combinación no estándar. Tras una media de 37 segundos, todos ellos aseguraron que el mate de la coz era la manera más rápida de ganar la partida. Sin embargo, al presentarles una posición muy similar pero que solo admitía el mate en tres jugadas, todos supieron verlo sin la menor dificultad. Por último, cuando les informamos de que ese mismo mate también podía ejecutarse desde la posición previa, mostraron sorpresa. «Es imposible», exclamó uno de los jugadores. «Tiene que haber sido un problema distinto; de haber existido una solución tan simple, la habría visto». Sin duda, la sola posibilidad de ejecutar el mate de la coz les había ocultado soluciones alternativas. El efecto *Einstellung* resultó tan potente que, durante unos instantes, consiguió rebajar el nivel de maestros del ajedrez al de jugadores de una categoría muy inferior.

La cámara de infrarrojos reveló que, incluso cuando los jugadores aseguraron haber buscado soluciones mejores —algo que creían sinceramente haber hecho—, en realidad nunca apartaron la vista de las casillas que intervenían en el mate de la coz. En cambio, cuando se enfrentaron a la posición que solo admitía el mate en tres jugadas, examinaron en un primer momento las casillas y piezas relevantes para ejecutar el mate de la coz, pero cuando se percataron de que no era posible llevarlo a cabo, ampliaron su foco de atención y hallaron la solución con facilidad.

BASES DEL SESGO COGNITIVO

El pasado mes de octubre, Heather Sheridan, de la Universidad de Southampton, y Eyal M. Reingold, de la de Toronto, publicaron resultados que corroboraban y complementaban nuestros experimentos. Mostraron a 17 jugadores principiantes y a otros tantos expertos dos posiciones diferentes. En la primera, aunque podía aplicarse una solución familiar, como el mate de la coz, existía otra más rápida y menos obvia. En la segunda, la combinación habitual desembocaba en un error de bulto. Al igual que en nuestro ensayo, cuando los jugadores (tanto principiantes como expertos) advirtieron que podían ganar con la combinación más conocida, rara vez dirigieron la mirada a otras casillas. Sin embargo, en los casos en los que dicha secuencia arruinaba la posición, todos los expertos y la mayoría de los principiantes detectaron la alternativa.

El efecto *Einstellung* no se limita a experimentos de laboratorio controlados ni a tareas mentales exigentes, como el ajedrez. Antes bien, constituye la base de numerosos sesgos cognitivos. En su *Novum organum*, de 1620, Francis Bacon escribió con gran elocuencia sobre uno de los más comunes: «El espírtu humano, una vez que lo han reducido ciertas ideas, [...] vese obligado a ceder a esas ideas poniéndose de acuerdo con ellas; y aunque las pruebas que desmienten esas ideas sean muy numerosas y concluyentes, el espíritu o las olvida, o las desprecia, o por una distinción las aparta y rechaza. [...] Los hombres [...] toman nota de las predicciones realizadas; pero de las otras, más numerosas, en que el hecho no se realiza, prescinden por completo. Es este un azote que penetra más sutilmente aún la filosofía y las ciencias; desde el punto en que un dogma es recibido en ellos, desnaturaliza cuanto le es contrario, sean las que fuesen la fuerza y la razón que se les opongan, y las someten a su antojo» (*traducción de R. Frondizi; Ed. Losada, Buenos Aires, 2003*).

En los años sesenta del siglo xx, el psicólogo inglés Peter Wason bautizó este fenómeno como «sesgo de confirmación». En experimentos controlados, demostró que, incluso cuando la gente intenta comprobar teorías de manera objetiva, se inclina a buscar indicios que confirmen sus ideas y desatiende cualquier elemento que las contradiga.

En *La falsa medida del hombre*, el investigador de Harvard Stephen Jay Gould revisó la información citada por varios autores que intentaban medir la inteligencia relativa de los diferentes grupos raciales, clases sociales y sexos. Para ello calculaban el peso del cerebro o el volumen del cráneo, ya que suponían una correlación entre esos parámetros y la inteligencia de un individuo. Gould constató una gran tergiversación de los datos. Cuando el neurólogo francés Paul Broca descubrió que el cerebro de los franceses era en promedio más pequeño que el de los alemanes, lo explicó como consecuencia de los diferentes tamaños corporales medios de galos y germanos. Al fin y al cabo, el científico no podía aceptar que sus compatriotas fueran menos inteligentes que los alemanes. Sin embargo, cuando descubrió que el cerebro de las mujeres era menor que el de los hombres, no aplicó ningún factor de corrección asociado al tamaño corporal, ya que no tenía nada que objetar a que las mujeres fuesen menos inteligentes que los hombres.

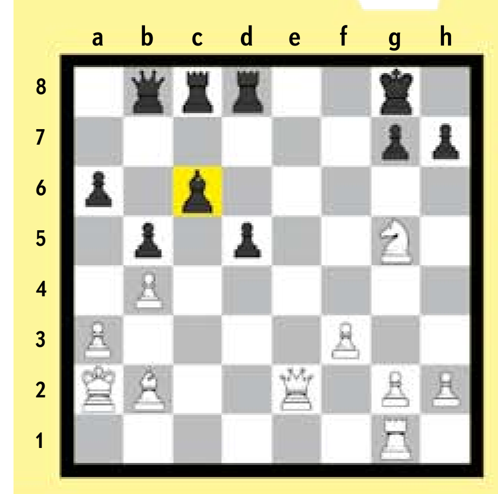
Aunque pueda sorprendernos, Gould concluyó que actitudes como la de Broca no eran tan reprobables como cabría pensar: «En la mayoría de los casos analizados en este libro, podemos estar casi seguros de que el sesgo [...] influyó de modo inconsciente y de que los científicos creían perseguir verdades impolutas», escribió. Tal y como ocurría en nuestros experimentos con el ajedrez, Broca y sus contemporáneos no pudieron ver más allá de las ideas que les resultaban familiares, lo que les llevó a cometer errores de razonamiento. He aquí el verdadero peligro del efecto *Einstellung*: creer que afrontamos un problema con la mente abierta cuando, en realidad, nuestro cerebro está filtrando selectivamente la información y haciéndonos pasar por alto otros aspectos que podrían inspirarnos ideas nuevas. Toda información que no encaje en la solución o teoría a la que nos habíamos aferrado es ignorada o descartada.

Esa naturaleza subrepticia del sesgo de confirmación tiene tristes consecuencias en la vida diaria. Así lo han demostrado varios estudios sobre el proceso de toma de decisiones en médicos y en miembros de jurados populares. En una revisión de diagnósticos erróneos, el facultativo Jerome Groopman observó que, en la mayoría de los casos, los fallos no se debían a un desconocimiento de los datos clínicos, sino a trampas cognitivas. Cuando un médico traspasa un paciente a otro colega, el diagnóstico del primer facultativo puede cegar al segundo hasta el punto de impedirle apreciar detalles importantes y contradictorios sobre la salud del sujeto. Resulta más sencillo aceptar el diagnóstico —la «solución»— que ya se tiene delante que volver

Más de lo que parece

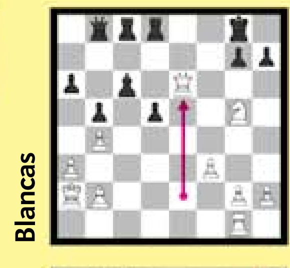
El ajedrez ha demostrado ser un campo de pruebas óptimo para estudiar el efecto *Einstellung*: la tendencia del cerebro a ceñirse a soluciones conocidas en vez de buscar otras mejores. Varios estudios recientes han demostrado que este sesgo cognitivo afecta a la manera en que los jugadores, incluso los más expertos, dirigen la vista hacia el tablero.

Problema con dos soluciones



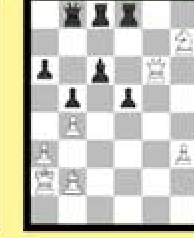
Movimiento 1 | Movimiento 2 | Movimiento 3

Blancas



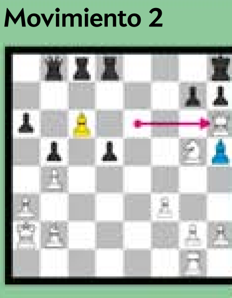


Negras


Movimiento 1 | Movimiento 2 | Movimiento 3

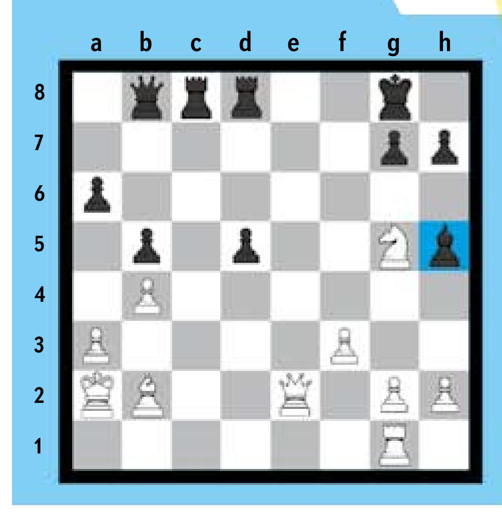
Blancas


Negras




Problema con una única solución



Ciegos ante la mejor solución

En el diagrama superior (*amarillo*), las blancas pueden ganar mediante el «mate de la coz», una combinación de cinco movimientos muy conocida entre los jugadores de ajedrez. Para ello deben comenzar llevando su dama a e6. El jaque y la amenaza de mate en f7 obligan al rey negro a retirarse a la esquina. Tras una sucesión de dos jaques con caballo, las blancas sacrifican su dama en g8, lo que fuerza a las negras a capturarla con la torre. El rey queda así encerrado y las blancas pueden dar mate situando el caballo en f7.

En una serie de experimentos, se invitó a varios maestros de ajedrez a resolver una posición (*verde*) que admitía dos soluciones: el mate de la coz, y otra que permitía vencer en tan solo tres movimientos. A los participantes se les pidió que encontrasen la combinación ganadora más corta. Nada más advertir que podían aplicar el mate de la coz, los jugadores parecieron incapaces de ver la segunda solución. En cambio, cuando se les mostró una posición casi idéntica (*azul*) pero en la que un alfil negro eliminaba la posibilidad de ejecutar el mate de la coz, enseguida encontraron el mate en tres jugadas.

Movimiento 4





Movimiento 5



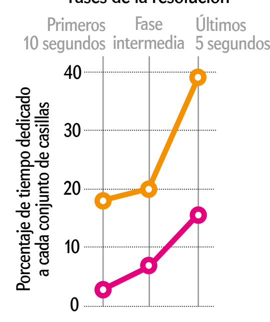


Orejeras mentales

El estudio de los movimientos oculares de los participantes reveló que, en cuanto advertían el mate de la coz, sus ojos se posaban durante mucho más tiempo en las casillas asociadas a dicha combinación (*naranja*) que en aquellas relevantes para dar mate en tres jugadas (*magenta*). Con todo, insistían en que habían buscado otras alternativas. Por el contrario, cuando el mate de la coz resultaba inviable, su mirada se centraba enseguida en las casillas asociadas a la combinación ganadora.

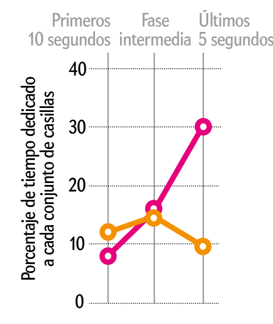
Posición con dos soluciones





Posición con una solución





GEORGE RETSECK

a evaluar todo el caso desde el principio. Por la misma razón, los radiólogos que examinan placas de tórax solo suelen fijarse en la primera anomalía que ven, lo que puede llevarles a obviar otros signos por lo demás evidentes, como una inflamación asociada a un tumor. Sin embargo, cuando esos indicios se presentan aislados, los localizan sin problemas.

Otras investigaciones han revelado que, durante un juicio, los miembros del jurado comienzan a decidir sobre la inocencia o culpabilidad del acusado mucho antes de que se presenten todas las pruebas. De hecho, su primera impresión sobre el procesado condiciona la manera en que sopesan los nuevos indicios e incluso el recuerdo que guardan de los que ya se han expuesto. De igual modo, si quien realiza una entrevista de trabajo encuentra físicamente atractivo a un candidato, tenderá a sobrevalorar su inteligencia y personalidad, y viceversa. Tales sesgos también se deben al efecto *Einstellung*: es más fácil formarse un criterio sobre una persona si se mantiene una posición invariable sobre ella que si se analizan una y otra vez datos contradictorios.

¿Podemos aprender a neutralizar el efecto *Einstellung*? Tal vez. Tanto en nuestros experimentos como en los efectuados por Sheridan y Reingold, algunos jugadores de nivel extraordinario, como grandes maestros, encontraron la solución óptima y menos obvia cuando era posible ejecutar una combinación conocida pero más larga. Ello parece sugerir que, cuanto mayor es la erudición en una disciplina —ya se trate de ajedrez, ciencia o medicina—, más inmune se es al sesgo cognitivo.

Con todo, nadie goza de una protección absoluta. Incluso los grandes maestros fallaron cuando se les presentó una posición lo suficientemente intrincada. Otra manera de contrarrestar el efecto *Einstellung* consiste en recordar de manera activa que podemos caer en él. Si, por ejemplo, deseamos comparar la contribución a la temperatura global de los gases de efecto invernadero antropogénicos y los de origen natural, haremos bien en recordar que, si pensamos que ya conocemos la respuesta, no juzgaremos las pruebas de manera objetiva. En su lugar, solo nos fijaremos en aquellos datos que sustentan nuestra opinión, los consideraremos más sólidos de lo que en realidad son y los recordaremos mejor que aquellos contrarios a nuestro punto de vista.

Si de verdad deseamos mejorar nuestras ideas, deberemos aprender de nuestros errores. Charles Darwin dio en su día con una técnica tan simple como efectiva para lograrlo: «He seguido [...] durante muchos años una regla de oro; a saber, siempre que un dato publicado, una nueva observación o un pensamiento se oponían a mis resultados generales, sin falta tomaba nota de ello al instante, [...] pues la experiencia me ha llevado a descubrir que tales hechos y pensamientos son mucho más proclives abandonar la memoria que aquellos que resultan favorables».

PARA SABER MÁS

Why good thoughts block better ones: The mechanism of the pernicious *Einstellung* (set) effect. Merim Bilalić, Peter McLeod y Fernand Gobet en *Cognition*, vol. 108, n.º 3, págs. 652-661, septiembre de 2008.

The mechanism and boundary conditions of the *Einstellung* effect in chess: Evidence from eye movements. Heather Sheridan y Eyal M. Reingold en *PLOS ONE*, vol. 8, n.º 10, art. e75796, 4 de octubre de 2013. **www.plosone.org/article/info%3Adoi%2F10.1371%2Fjournal.pone.0075796**

EN NUESTRO ARCHIVO

La mente del experto. Philip E. Ross en *IyC*, octubre de 2006.

La mente desatada. Shelley Carson en *MyC* n.º 59, 2013.

por Marc Boada Ferrer

Marc Boada Ferrer es divulgador científico y experto en ciencia experimental.



Materia cristalina

Emular la naturaleza y tratar de obtener los maravillosos cristales con los que nos obsequia es más un arte que una ciencia

Casi todas las actividades científicas, sobre todo las artes afines a la física y la química, comparten el interés por los cristales. Para celebrar en estas páginas el Año Internacional de la Cristalografía, dedicaremos la sección a estas maravillosas joyas naturales. Para empezar, podríamos definirlas como estructuras tridimensionales donde los átomos, ya sean de un elemento o un compuesto químico, se hallan distribuidos en el espacio formando una celda elemental que se repite una y otra vez, generando un retículo, o red, que puede llegar a tener dimensiones macroscópicas.

Conocemos siete sistemas cristalinos (triclínico, monoclínico, ortorrómbico, tetragonal, cúbico, trigonal y hexagonal) y catorce retículos espaciales básicos o redes de Bravais (que se obtienen al conjugar los siete sistemas cristalinos con las distintas formas que tienen los átomos de distribuirse en la celda elemental), a partir de los cuales se obtienen decenas de combinaciones. Además, cada compuesto químico cristaliza típicamente de un modo que lo caracteriza; es lo que el mineralólogo llamaría el hábito cristalino. Y es precisamente en el mundo mineral donde estos fenómenos estructurales se expresan con magnificencia: la gran mayoría de los minerales forman cristales perfectos que van de lo microscópico a lo decamétrico.

En esta ocasión, trataremos de obtener en el laboratorio dichas singularidades del mundo natural, ya que cristalizar sustancias no es solo una forma de desafiar la naturaleza, sino también un proceso del máximo interés técnico. La cristalización repetida permite separar compuestos químicos o caracterizar proteínas; su control preciso nos posibilita disfrutar de placeres como el chocolate en sus varios formatos y texturas [*véase* «El chocolate», por Pere Castells; Investigación y Ciencia, marzo de 2009] y cuando necesitamos elementos con propiedades técnicas excepcionales recurrimos a grandes monocristales. El óptico, además de usar el vidrio (material amorfo constituido por largas cadenas de silicatos dispuestas al azar), adereza sus instrumentos con ventanas, prismas o lentes tallados en monocristales de bromuro de potasio, sal común o germanio, por citar solo tres ejemplos. Con ello consigue piezas con idénticas propiedades refractivas en toda la masa, controla la birrefringencia y garantiza la eliminación de tensiones mecánicas.

Existen casos aún más espectaculares: los álabes de las turbinas de algunos aviones militares son monocristales de aleaciones metálicas, con lo que su resistencia al esfuerzo roza el límite teórico. En realidad, numerosos metales y aleaciones cristalizan fácilmente (el estaño ❶, por ejemplo, lo hace en la superficie de un lingote lentamente solidificado). El estudio de estas estructuras, la metalografía, constituye la piedra angular de las artes metalúrgicas.

En nuestro laboratorio casero podemos obtener cristales milimétricos de cobre por electrolisis de una disolución de su sulfato, un proceso que la industria química utiliza extensísimamente para el refino de este y numerosos metales.

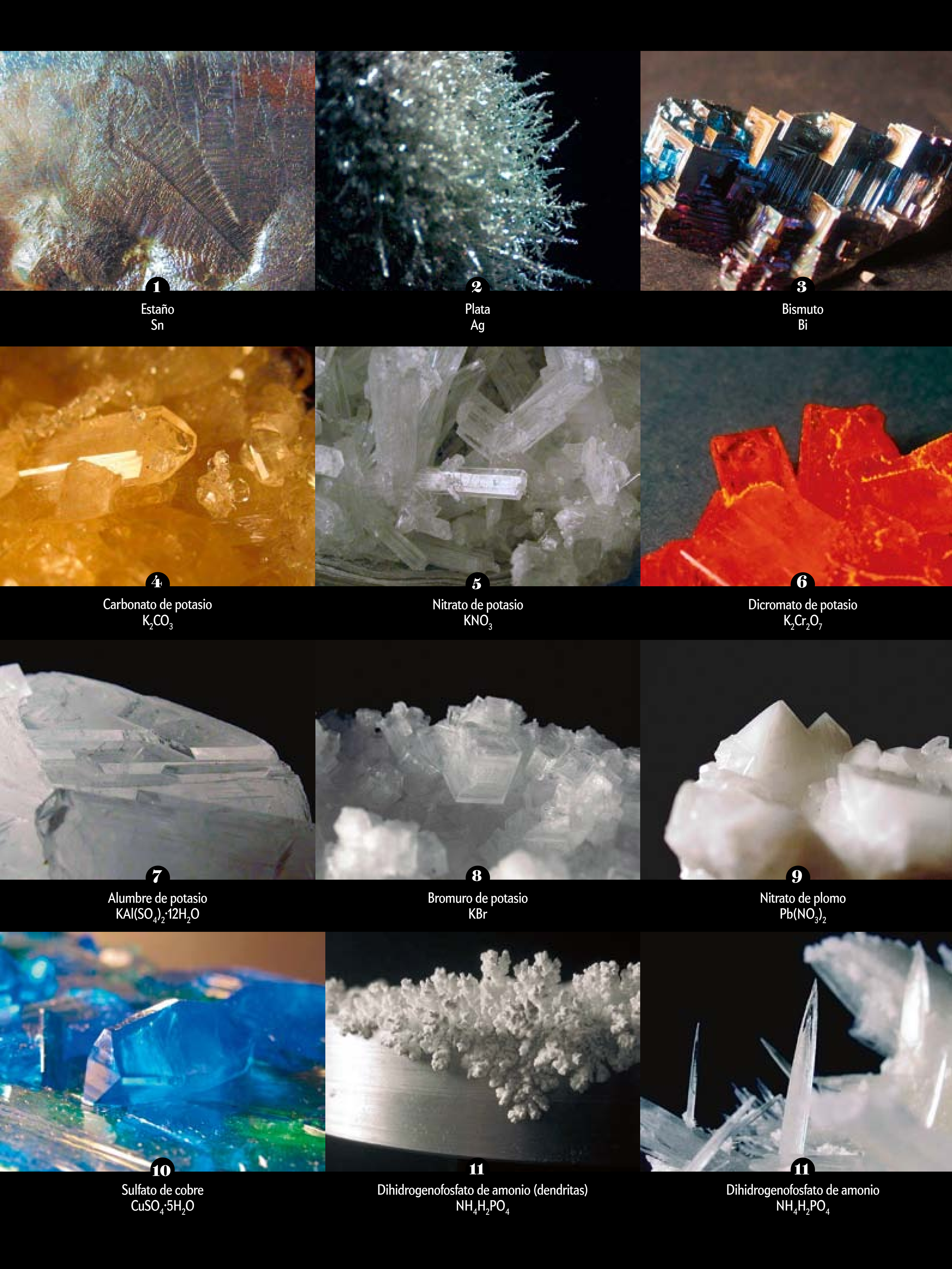
Las fuerzas electrolíticas intervienen también en un experimento a escala de tubo de ensayo, conocido de antiguo: si sumergimos una lámina de cobre en una disolución de nitrato de plata aparecerá un depósito cristalino argentado ❷, acicular y arborescente, bellísimo observado al microscopio. En ausencia del nitrato de plata, sal muy onerosa, podemos sumergir cinc en una disolución de cualquier sal de cobre, y experimentar con otras muchas combinaciones. Lo único que debemos tener en cuenta es que exista una cierta diferencia en la electronegatividad de los metales puestos en juego: el de la sal siempre debe ser más noble (menos reactivo) que el de la placa que vamos a sumergir, para que esta se disuelva a favor de la formación de un depósito del metal más electropositivo. Así obtendremos bonitos cristales, pero siempre pequeños y delicados.

Si lo que queremos son cristales de gran tamaño, deberemos cambiar el proceso. Localicemos bismuto, un metal barato, poco tóxico y de bajo punto de fusión. Pongamos un crisol al fuego (un molde para hacer flan casero, de acero inoxidable, resulta óptimo). Pongamos el bismuto en su interior y esperemos a que funda completamente. Con una cucharilla retiremos la escoria sobrenadante y apaguemos el fuego. Esperemos unos minutos y observaremos la aparición, en la superficie, de estructuras poligonales; luego esta se abomba y se observan algunas grietas, por las que escapan gotas de metal líquido, como si de mercurio se tratara. (Ello se debe a que el bismuto posee un coeficiente de dilatación negativo, pero esto ahora no nos interesa.)

Tomemos ahora un hierro aguzado y bien caliente, y ampliemos el agujero por donde fluye el bismuto. Volquemos rápidamente el líquido en un recipiente idéntico. Esperemos a que el primer crisol se enfríe y procedamos a romper el bloque de metal solidificado. Aparecerá una espectacular geoda de cristales metálicos, que, además, mostrarán, por oxidación superficial, todos los colores del espectro. Las bellísimas estructuras escalonadas se encajan entre ellas formando maclas con ángulos característicos.

Si deseamos ir al encuentro de cristales más voluminosos todavía, deberemos repetir la operación intentando reducir al mínimo las vibraciones y aislando térmicamente el recipiente, de forma que los cristales crezcan lentamente y sin perturbaciones —algo que fuere cual fuere el método de cristalización adoptado siempre deberemos tener muy en cuenta—. Más aún, separando una y otra vez la última

Ilustraciones de Marc Boada



1 Estaño Sn

2 Plata Ag

3 Bismuto Bi

4 Carbonato de potasio K_2CO_3

5 Nitrato de potasio KNO_3

6 Dicromato de potasio $K_2Cr_2O_7$

7 Alumbre de potasio $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$

8 Bromuro de potasio KBr

9 Nitrato de plomo $Pb(NO_3)_2$

10 Sulfato de cobre $CuSO_4 \cdot 5H_2O$

11 Dihidrogenofosfato de amonio (dendritas) $NH_4H_2PO_4$

11 Dihidrogenofosfato de amonio $NH_4H_2PO_4$

porción líquida conseguiremos retirar las impurezas, ya que estas suelen concentrarse en la fase fluida; con un metal más refinado habrá menos gérmenes donde puedan empezar a crecer las imperfecciones. Obtendremos así cristales de un elemento puro, el bismuto **3**, inimaginables en el mundo natural.

Pero no siempre es tan «sencillo». En ocasiones, las sustancias se resisten al crecimiento ordenado. Lograr la formación de compuestos tan abundantes como la calcita o los otros carbonatos no es tarea fácil, aunque esta se funda en un principio simple: un doble intercambio entre dos compuestos. Tomemos una disolución de cloruro de calcio y otra de carbonato de potasio; procedamos a su mezcla. Observaremos la aparición de un depósito opaco que sedimenta en unos días. ¿Qué ha sucedido? Pues que el ion cloro ligado al calcio ha migrado y ha sido substituido por el grupo carbonato que se hallaba unido al potasio. El resultado: la formación de carbonato de calcio (calcita), insoluble, y cloruro de potasio, que permanece disuelto.

Ahora bien, ¿cómo proceder para que la mezcla entre las dos disoluciones produzca un depósito cristalino? Una posibilidad es efectuar la reacción en un medio gelificado. Tubos llenos de gelatina con diversos reactivos, abandonados durante meses o años, acaban por mostrar estructuras cristalinas que recuerdan a los árboles de plata que hemos descubierto antes.

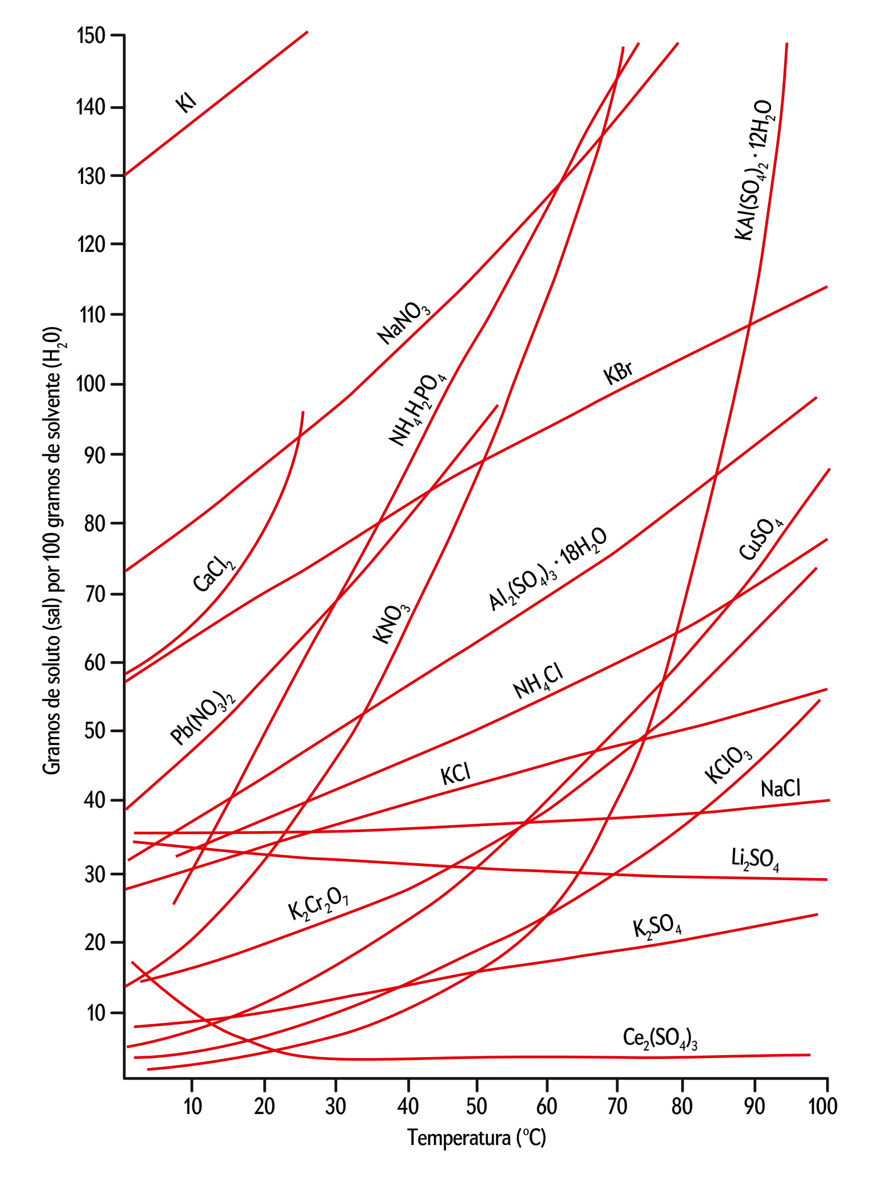
Otra posibilidad consiste en realizar la reacción a través de una membrana semipermeable. Con este propósito, colgué en mi taller una membrana tubular en el centro de un vaso de precipitados. En una primera prueba llené el interior de la membrana con la disolución de cloruro de calcio y el vaso con la de carbonato de potasio; para compensar las distintas presiones osmóticas, diluí este último compuesto hasta que el nivel en el interior de la membrana permaneció constante.

En un segundo ensayo, invertí la posición de los compuestos. En ambos casos crecieron sobre la membrana y en la cara en contacto con el carbonato millones de cristales, perfectos pero microscópicos. Lamentablemente, y pese a que esperé durante semanas, mientras aportaba nuevas diluciones de sales, nunca crecieron hasta ser visibles a simple vista. Eso sí, el abanico de resultados fue impresionante. Rebuscando entre los residuos encontré pequeñas geodas, cristales filiformes, recrecimientos rítmicos y estructuras arriñonadas y dendríticas. He aquí un reto para los experimentadores más capaces: llevar lo diminuto al dominio visible.

La naturaleza, por el contrario, nos obsequia con joyas minerales de varios metros de longitud; eso sí, tarda a veces centenares de miles de años en construir semejantes gemas por lentísima precipitación geoquímica [*véase* «El bosque de los cristales gigantes», por Giovanni Badino y Paolo Forti; Investigación y Ciencia, octubre de 2011].

A escala humana no disponemos de tanto tiempo. Debemos usar técnicas más veloces, como el enfriamiento lento o la evaporación de disoluciones. En efecto, si estudiamos las curvas de disolución de distintos compuestos (*gráfica*) comprobaremos la existencia de dos casos extremos: aquellos cuya solubilidad aumenta muchísimo con la temperatura y los que prácticamente no presentan dicha variación. Para los primeros, el proceso óptimo es el enfriamiento controlado; para los segundos, la evaporación lenta.

Y claro, si de evaporar se trata, la sal común es el material de experimentación más accesible. Preparemos una disolución concentrada de sal poniendo al fuego un recipiente bien limpio, en el cual calentaremos agua destilada. Cuando esté bastante caliente, añadiremos sal común y agitaremos la mezcla hasta su completa disolución. Repetiremos el proceso hasta que el líquido quede sobresaturado, es decir, hasta que comiencen a aparecer costras en la superficie del mismo y en el fondo se acumulen cristalitos ya incapaces de solubilizarse. En este estado de



EFECTO DE LA TEMPERATURA sobre la solubilidad de varios compuestos.

precipitación, la cristalización es demasiado rápida y solo obtendremos depósitos microcristalinos.

A continuación, taparemos el recipiente y dejaremos que se enfríe hasta que su temperatura sea la ambiental. Luego, trasvasaremos casi todo el líquido a su contenedor definitivo, el cristalizador, filtrándolo siempre sin remover y dejando sin decantar el último poso cargado de sal precipitada. Con todo ello, habremos conseguido una disolución saturada en estado de equilibrio a temperatura ambiente. Solo quedará colocar el cristalizador en un lugar ventilado, cálido y al abrigo del polvo. Entonces, a medida que avance la evaporación, el equilibrio se tornará inestable y las moléculas de sal tenderán a precipitar. Si por el camino encuentran un cristal incipiente, se sumarán a este, contribuyendo a su crecimiento.

Tras unas semanas, aparecerán en el fondo del cristalizador unos bonitos cristales cúbicos. Pese a todo, la sal común cristaliza con ciertas dificultades. Por suerte, obtener estructuras de gran tamaño es más fácil si introducimos en la disolución algunos gérmenes o compuestos que promuevan la cristalización. Todo aficionado a los cristales sabe de la importancia de sembrarlos de forma adecuada. Por tanto, podemos ensayar el efecto de distintas sustancias añadidas a nuestra disolución de sal. Unos cristalitos de nitrato de potasio o nitrato de plomo obran milagros; con el último conseguimos el crecimiento de pirámides escalonadas, un resultado muy parecido a las escamas salinas con las que la alta cocina adereza sus platos —lástima que al añadir sal de plomo la hemos tornado fuertemente tóxica—. También el vinagre modifica el hábito. Dejamos a la imaginación del experimentador la investigación del efecto de otros gérmenes cristalinos.

Exploremos ahora el enfriamiento lento. Preparemos de nuevo una disolución sobresaturada, pero a una temperatura superior, entre 60 y 70 ºC. Cuando los síntomas de sobresaturación ya sean evidentes, añadiremos un poco más de agua y volveremos a calentar. El objetivo es, como antes, llevar la disolución a un punto de equilibrio estable. Procederemos a su filtrado, utilizando un filtro previamente caldeado con agua bien caliente.

Llevaremos luego la disolución a su emplazamiento definitivo, donde se enfriará lentísimamente. Para ello utilizaremos un contenedor bien aislado y con una gran inercia térmica. Un refrigerador doméstico en desuso —pero operativo, claro— será perfecto. Colocaremos en la parte baja de la nevera un bidón tan grande como sea posible, que llenaremos de agua a la misma temperatura que la disolución que estamos preparando; podemos incluso sumergir en este un calefactor de acuario, de forma que podamos controlar su temperatura mediante un termostato exterior.

Introduciremos también distintas sondas de termómetro, para controlar en todo momento la temperatura de las disoluciones, del ambiente interior y del bidón de agua. Nivelaremos la nevera, sellaremos todas las perforaciones e introduciremos tantos cristalizadores como sea posible con otras tantas disoluciones. El objetivo es doble: aumentar al máximo la inercia térmica y economizar la energía. Cubriremos con cinta adhesiva aislante las juntas de las puertas. Pasaremos luego a efectuar lecturas sistemáticas de la temperatura de los distintos puntos; comprobaremos que caen lentamente.

Se dice que un descenso de un grado centígrado diario resulta perfecto. Podemos intentarlo. Mediante un pequeño programa (en Arduino, por ejemplo) gestionaremos los datos de los termómetros y aportaremos la energía necesaria mediante el calefactor de acuario, para que el enfriamiento sea continuo y muy prolongado. Cinco grados de descenso diario ya suministran cristales espectaculares de carbonato ❹, nitrato ❺, dicromato ❻, alumbre ❼ y bromuro ❽ de potasio [*véase* «Obtención de compuestos de potasio» *en esta misma sección*; Investigación y Ciencia, abril de 2010]. También el nitrato de plomo ❾ y el sulfato de cobre ❿ producen bellos cristales, azules los últimos, que luego aún podemos hacer crecer más por evaporación. Pero, sin duda, el rey de la cristalización es el dihidrogenofosfato de amonio ⓫, un fertilizante que, por cristalizaciones y filtrados repetidos, sumados a una parsimoniosa refrigeración, acaba por rendir geodas de ensueño.

Como decíamos, el contenido de la nevera pierde calor lentamente hasta llegar a temperatura ambiente. Habrá llegado el momento de desconectar el calefactor del bidón de agua y enchufar la nevera. Previamente habremos puenteado el termostato que incorpora de fábrica, es decir, desconectaremos este, para conectar el motor de la nevera a un termostato más preciso, que podremos adosar al exterior de la nevera o a nuestro ordenador; ello nos permitirá gestionar la temperatura interior con mayor precisión y sin tener que abrir la puerta de la nevera. De nuevo, y con la misma cadencia, procederemos a refrigerar el interior, hasta llegar a uno o dos grados bajo cero, o incluso algo más frío. Recordemos el efecto que las sustancias en disolución obran sobre el punto de congelación del agua. Observemos también que, al disolver las sales, la temperatura del solvente varía; a menudo desciende, a veces de forma muy perceptible, como ocurre al disolver el nitrato de potasio.

Sea como fuere, en un par de semanas la temperatura de nuestros cristalizadores habrá bajado de los 60 o 70 ºC iniciales a prácticamente el punto de congelación. Habrá llegado el momento de descubrir el interior de la nevera, cerrada a cal y canto durante ese tiempo. Nuestros ojos se abrirán como si nos halláramos ante los tesoros de las minas del rey Salomón: cristales gigantes, incoloros, azules, rojos o verdosos nos ofrecerán un espectáculo inmejorable.

Pero todavía no podemos cantar victoria. Nos faltará un paso importante: rescatar los cristales del medio líquido donde permanecen y conservarlos, si es el caso, para el futuro. Volcaremos el líquido en un recipiente bien limpio, poco a poco y prestos a sujetar los cristales por si se despegan del fondo. Colocaremos luego el cristalizador en posición casi vertical, de forma que se escurran los últimos vestigios de disolución. Con buen pulso y un papel secante absorberemos hasta las últimas gotas retenidas, por capilaridad, entre los cristales de la parte inferior. A continuación, dejaremos secar el conjunto. Si se trata de una sal higroscópica, aplicaremos una leve capa de barniz o laca transparentes sobre los cristales. En caso contrario, nos arriesgamos a verlos convertidos en bellas eflorescencias fractaloides, bonitas pero criptocristalinas.

El científico aficionado tiene ancho campo por recorrer y puede ensayar otras muchas técnicas. Puede usar antisolventes, líquidos que se mezclan fácilmente con el disolvente (agua, en este caso) pero no con la sustancia disuelta, precipitándose esta; colgar cristales, mediante un hilo, en el seno de la disolución; variar las dimensiones y proporciones de los cristalizadores o hacer crecer los cristales sobre materiales con retículos similares a los de la sustancia que se quiere precipitar. Mil y un caminos para explorar el mundo de la materia cristalina.

por Bartolo Luque

Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.



Dimensiones platónicas

¿Puede aplicarse el análisis dimensional en el universo ideal de las matemáticas?

El 16 de julio de 1945 explotó en el desierto de Nuevo México la primera bomba atómica de la historia. Bautizada como *Trinity*, el estallido marcó el comienzo del lado oscuro de la era nuclear. El físico Enrico Fermi, que tuvo el discutible honor de asistir en directo a la explosión, dejó caer confeti antes y durante la llegada de la onda expansiva para, a partir del desplazamiento horizontal de los pedacitos de papel, estimar la potencia liberada. Lo logró con una precisión asombrosa: una miniproeza mítica hoy entre los físicos.

Pocos años después del fin de la guerra, el Gobierno de EE.UU. desclasificó las fotografías del ensayo nuclear de *Trinity*. Aunque fueron publicadas de inmediato por la prensa, no se precisaron los detalles de la bomba ni mucho menos la potencia de la explosión, que seguía siendo un secreto militar. Sin embargo, el físico británico Geoffrey Taylor rizó el rizo cuando publicó un artículo en el que evaluaba, a partir de las fotografías, la potencia desatada por el ingenio. Para ello le bastó poco más que un sencillo análisis dimensional.

El análisis dimensional fue descrito rigurosamente por el físico Edgar Buckingham en el hoy famoso teorema pi. Pero no pequemos de pejigueras: la idea, expresada llanamente, consiste en imponer que las unidades a ambos lados de una igualdad coincidan. En la educación básica nos enseñan a utilizar esta condición para descartar resultados erróneos. Sin embargo, su verdadera potencia reside en que, en ocasiones, nos permite encontrar respuestas muy precisas sin realizar casi ningún cálculo.

En la imagen de la detonación de *Trinity* (*fotografía*) vemos una bolsa de gas caliente y a alta presión generada 0,016 segundos después de la explosión (el infame hongo con el que todos asociamos las explosiones nucleares se produce con posterioridad). Gracias a sus conocimientos de dinámica de gases, Taylor sabía que el radio R de esa bola de fuego dependía esencialmente del tiempo t transcurrido desde la explosión, de la cantidad de energía E liberada por la bomba y de la densidad ρ del aire circundante. Suponiendo una relación general del estilo:

$$R \propto t^p \, E^q \, \rho^k \, ,$$

y teniendo en cuenta que las dimensiones de estas cantidades son $[R] = L$ (unidades de longitud), $[t] = T$ (unidades de tiempo), $[\rho] = M/L^3$ (donde M denota unidades de masa) y $[E] = ML^2/T^2$, llegamos a un sencillo sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned} 2q - 3k &= 1 \\ p - 2q &= 0 \\ q + k &= 0 \end{aligned}$$

cuya única solución es $p = 2/5$, $q = 1/5$ y $k = -1/5$. De modo que, salvo una constante multiplicativa adimensional, la energía liberada por la explosión debía ser:

$$E \propto \frac{R^5 \rho}{t^2} \, .$$

Taylor había concluido que, bajo las condiciones del ensayo, la constante multiplicativa debía rondar la unidad. A partir de una serie temporal de fotografías, obtuvo los tamaños de las bolas de fuego y los tiempos transcurridos, que, sustituidos en su fórmula, arrojaban el equivalente a entre 16.800 y 23.700 toneladas de TNT. Más tarde, el Ejército reveló que la cifra correcta correspondía a unas 20.000 toneladas de TNT. Nada mal para un cálculo de cuatro líneas a partir de unas fotos.

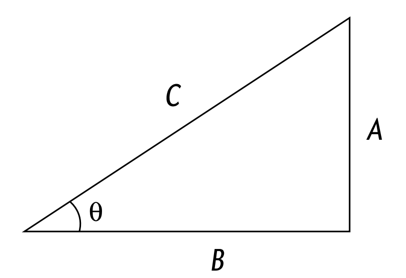
LA PRIMERA explosión nuclear de la historia, 0,016 segundos después del estallido.

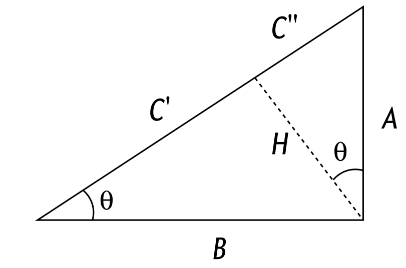
GOBIERNO DE LOS EE.UU. (DOMINIO PÚBLICO)

Análisis dimensional en matemáticas

Las unidades sirven para medir atributos físicos, como distancias o tiempos. El análisis dimensional constituye una herramienta muy empleada por los físicos y, sin duda, adecuada para el mundo físico. Pero ¿puede usarse en el mundo ideal de Platón, en el universo mental de los matemáticos? La respuesta es afirmativa. Veamos un ejemplo.

Observe el triángulo rectángulo de la figura adjunta. Cualquier triángulo rectángulo se deja caracterizar por completo





UN TRIÁNGULO RECTÁNGULO dividido en dos triángulos semejantes. Un sencillo análisis dimensional permite demostrar de inmediato el teorema de Pitágoras.

a partir de la longitud de su hipotenusa, C, y el ángulo θ que forma con uno de sus catetos. Por tanto, su área S solo puede ser una función de su hipotenusa y de θ:

$$S = S(C,\theta) \ .$$

Demos unidades a las variables en juego. Resulta «natural» asignar al área dimensiones de superficie, $[S] = L^2$, y, a la hipotenusa, dimensiones de longitud, $[C] = L$. Medido en radianes, el ángulo θ es adimensional, $[\theta] = 1$, puesto que se obtiene como un cociente de longitudes. La única manera de que en nuestra función las unidades sean cabales implica que:

$$S(C,\theta) = C^2 f(\theta) \ ,$$

donde f denota una función desconocida.

Tracemos ahora la altura H de nuestro triángulo. Ahora disponemos de dos nuevos triángulos rectángulos: $\triangle BHC'$, con hipotenusa B, y $\triangle AHC''$, con hipotenusa A, ambos con el mismo ángulo θ que el primero. Puesto que el área de $\triangle CBA$ es la suma de las áreas de los dos triángulos menores, podemos escribir:

$$S(C,\theta) = S(A,\theta) + S(B,\theta) \ ,$$
$$C^2 f(\theta) = A^2 f(\theta) + B^2 f(\theta).$$

Simplificando, tenemos que $C^2 = A^2 + B^2$. ¡Una preciosa demostración del teorema de Pitágoras!

Identidades de cálculo

La geometría euclídea hunde sus raíces en nuestro espacio físico cotidiano, gracias a lo cual nos ha resultado «natural» asignar unidades. Pero ¿podemos hacer algo parecido en un contexto matemático más alejado del mundo físico? Sanjoy Mahajan nos propone, en su heterodoxo libro *Street-fighting mathematics,* emplear el análisis dimensional para evaluar integrales, al menos hasta cierto punto. Consideremos la siguiente integral definida:

$$\int_a^b \sqrt{1 - \alpha x^2}\, dx \ ,$$

donde $\alpha > 0$. El método clásico para resolverla emplea el cambio de variables $x = \cos\theta/\sqrt{\alpha}$, junto con un par de identidades trigonométricas: $\operatorname{sen}^2\theta + \cos^2\theta = 1$ y $\operatorname{sen}^2\theta = (1 - \cos(2\theta))/2$.

¿Qué podemos conseguir a través del análisis dimensional? Aunque no lograremos resolver la integral por completo, sí podremos determinar fácilmente su dependencia con α. Fijémonos en el radicando. Si suponemos que $[x] = L$ (es decir, que tiene dimensiones de longitud), dado que 1 es adimensional no queda más remedio que $[\alpha] = L^{-2}$. ¿Qué dimensiones deberíamos asignar al diferencial dx? Podemos interpretar dx como «un poquito de x», por lo que $[dx] = L$. Y puesto que una integral no es más que una suma, tenemos que:

$$\left[\int_a^b \sqrt{1 - \alpha x^2}\, dx\right] = L \ .$$

Observemos que el valor de la integral definida será cierta función de α, $f(\alpha)$. Exijamos ahora coherencia dimensional: puesto que $[f(\alpha)] = L$ y $[\alpha] = L^{-2}$, la solución tiene que ser proporcional a $1/\sqrt{\alpha}$.

No parece gran cosa, pero observemos que el análisis dimensional nos permite llegar hasta aquí sin saber integrar, sin conocer identidades trigonométricas y sin efectuar cambio de variable alguno. Desde luego, se trata de un método rápido y fiable para localizar posibles errores en el resultado final.

Veamos un último ejemplo, debido a J. R. Torczynski. En este caso se trata de demostrar la siguiente igualdad entre las derivadas de una función $x(y)$ y las de su inversa, $y(x)$:

$$\frac{d^2x}{dy^2} = -\left(\frac{dy}{dx}\right)^{-3} \frac{d^2y}{dx^2} \ .$$

La forma estándar de demostrarla utiliza la repetición mecánica y un tanto farragosa de la regla de la cadena. ¿Cómo obtenerla sin derivar?

Observemos que la identidad no depende explícitamente de las coordenadas x e y, ya que una traslación de las funciones no afecta a las pendientes, curvaturas, etcétera. Así que:

$$\frac{d^2x}{dy^2} = F\left(\frac{dy}{dx}, \frac{d^2y}{dx^2}\right).$$

La segunda derivada de la función $x(y)$ solo puede depender de la primera y segunda derivadas de su función inversa, $y(x)$. Demos dimensiones arbitrarias a x e y. Por ejemplo, supongamos que x tiene dimensiones de longitud, $[x] = L$, e y de tiempo, $[y] = T$. Dado que dx y dy pueden interpretarse como «un poquito» de x e y, respectivamente, concluimos que:

$$\left[\frac{dy}{dx}\right] = L^{-1}T^{1} \ .$$

De igual modo, tendremos $[dx^2] = L^2$ y $[dy^2] = T^2$. ¿Y el diferencial segundo, d^2x? Pues sería «un poquito de un poquito de x», o como decía mi abuela, «una chispa de *na*». Así que la diferencial segunda tendrá las mismas dimensiones que la variable: $[d^2x] = L$ y $[d^2y] = T$. Por tanto:

$$\left[\frac{d^2x}{dy^2}\right] = L^1T^{-2} \quad \text{y} \quad \left[\frac{d^2y}{dx^2}\right] = L^{-2}T^1 \ .$$

De esta manera llegamos a la ecuación dimensional:

$$L^1T^{-2} \propto (L^{-1}T^1)^p\,(L^{-2}T^1)^q \ ,$$

de donde deducimos que $-p - 2q = 1$ y $p + q = -2$, que admite como única solución $p = -3$ y $q = 1$. ¡Hemos demostrado la igualdad a excepción de una constante! Para determinarla, podemos utilizar una función particular. Tomemos $y = e^x$, que resulta fácil de derivar y tiene como inversa $x = \ln y$. Al sustituir en la igualdad, encontraremos que la constante es –1.

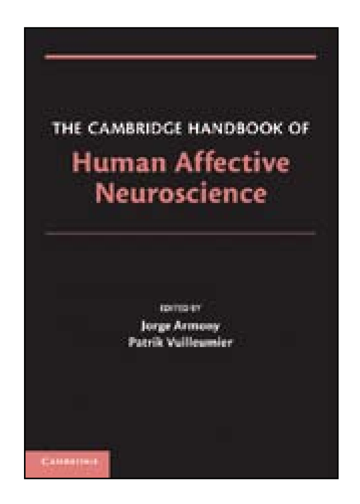
Un último detalle: al final hemos derivado. ¿Se le ocurre al lector cómo determinar la constante sin necesidad de derivar una función concreta?

PARA SABER MÁS

The formation of a blast wave by a very intense explosion II: The atomic explosion of 1945. Geoffrey Taylor en *Proceedings of the Royal Society of London A*, vol. 201, n.º 1065, págs. 175-186, 1950.

Dimensional analysis and calculus identities. J. R. Torczynski en *The American Mathematical Monthly*, vol. 95, n.º 8, págs. 746-754, 1988.

Street-fighting mathematics: The art of educated guessing and opportunistic problem solving. Sanjoy Mahajan. The MIT Press, 2010.



THE CAMBRIDGE HANDBOOK OF HUMAN AFFECTIVE NEUROSCIENCE.

Preparado por Jorge Armony y Patrik Vuilleumier. Cambridge University Press; Cambridge, 2013.

Cognición emocional

Neurociencia de la afectividad

Dirigido por Jorge Armony y Patrik Vuilleumier, dos reconocidos expertos en mecanismos cerebrales del procesamiento emocional y neuroimagen de la cognición, respectivamente, y escrito por jóvenes investigadores, este manual representa un hito en la evolución del pensamiento sobre el papel de las emociones en la mente. El propio panorama abarcado constituye un testimonio de la madurez del campo. La emoción ha entrado ya en el núcleo temático de la antropología y la neurociencia, la inteligencia artificial y la filosofía.

Desentrañar la emoción humana y los mecanismos que subyacen a su generación o expresión ha constituido una preocupación intelectual durante milenios. Pero su estudio científico, en particular desde el punto de vista de la biología, es muy reciente; sobre todo, si lo comparamos con la visión, el lenguaje, la atención, la memoria u otros procesos mentales. Pese a tal arranque tardío, el enfoque neurocientífico de las emociones ha experimentado un desarrollo espectacular a lo largo de los últimos diez años. Y hemos asistido al nacimiento de una nueva disciplina: la neurociencia de la afectividad. Los resultados cosechados se deben en buena medida a los importantes progresos en el empleo de técnicas de neuroimagen no invasivas: tomografía por emisión de positrones (PET), electroencefalografía (EEG), magnetoencefalografía (MEG) y, en particular, resonancia magnética funcional (fMRI), junto con refinamientos en métodos más tradicionales (estudio de lesiones, medidas de conducta y registros fisiológicos).

Apoyada en la investigación fisiológica que la había precedido, la neurociencia de la afectividad comenzó centrándose en las denominadas emociones básicas, con especial atención al miedo, a partir de estímulos visuales (por ejemplo, la expresión facial). Hoy el estudio de las emociones cubre diversas modalidades sensoriales, procesos, interacciones con otros sistemas y diferencias individuales. De intento se ha dejado aquí de lado las emociones en el reino animal, lo que no significa minusvalorar su importancia. De hecho, numerosas aportaciones obtenidas de experimentos con animales han permitido perfilar el cuadro en cuyo interior se ha desarrollado la neurociencia de las emociones.

Desde su emergencia en los años noventa del siglo pasado, la neurociencia de la afectividad ha extendido su campo de interés científico. No se ciñe a las emociones, sino que abarca otros fenómenos afectivos (talante, preferencias y disposiciones). Así, suele definirse la neurociencia afectiva en relación a la neurociencia cognitiva. En última instancia, la razón postrera de la importancia creciente de la neurociencia cognitiva hay que buscarla en el reconocimiento de que las emociones entran en el ámbito de los conceptos y métodos propios de la neurociencia cognitiva para constituir una neurociencia cognitiva de las emociones. Podemos recordar, por botón de muestra, las interacciones entre emoción y atención, y entre emociones y toma de decisiones.

Herbert Simon y Marvin Minsky, pioneros en inteligencia artificial, han destacado el papel de las emociones dentro de la exposición de modelos de mente. Para Minsky, no se trata de si las máquinas inteligentes pueden presentar emociones, sino de si puede haber máquinas inteligentes sin emociones. Esa perspectiva visionaria, de acuerdo con la cual las emociones deben modelarse en inteligencia artificial, fue determinante para la creación de un nuevo campo de investigación, la «computación afectiva», que pone en relación emociones y otros fenómenos afectivos. La base de este tipo de computación reside en el establecimiento de modelos fundados en indicaciones psicológicas y neurocientíficas. Armony, por ejemplo, propone un modelo conexionista computacional de condicionamiento del miedo, delimitado por lo que se sabe sobre la neuroanatomía y neurofisiología del aprendizaje del miedo; en particular, mediante la modelización de las vías corticales y subcorticales hasta la amígdala.

Pero ¿qué es una emoción? A imagen de lo que clásicamente se dice del tiempo, todos saben qué es una emoción hasta que se les pide una definición. Las definiciones de emoción varían no solo en función de la disciplina, sino también a lo largo de la historia y a través de las culturas. Los griegos la llamaban *pathos*. Para Aristóteles, la emoción era aquello en razón de lo cual las personas cambiaban y diferían en sus juicios y de lo cual esperaban dolor o placer. Esta definición ejerció una gran influencia; amén de sugerir un vínculo entre emoción y juicio, contenía también la dimensión que hoy incorporan los modelos: la valencia, es decir, dolor y placer. LeDoux subraya hoy que las emociones no pueden ser inconscientes, pues están cargadas de afecto y estados de consciencia que se experimentan subjetivamente. Las emociones son estados de consciencia. Neurológicamente, se trata de un conjunto de respuestas que proceden de partes del cerebro a estímulos corporales, y de partes del cerebro a otras zonas del mismo.

Dentro de la propia categoría de emoción caben diferentes tipos. Descartes distinguía seis emociones primarias: admiración, amor, odio, deseo, gozo y tristeza. Admitía que las demás se reducían a estas o eran una combinación de las mismas. Ahora, el grupo básico, capítulo obligado de toda investigación neurocientífica sobre las emociones, está integrado por el miedo, el disgusto, la angustia, la fruición o gozo, la tristeza y la sorpresa. Cada emoción presenta su propia singularidad característica, que se fue alcanzando y definiendo a lo largo de la evolución. Buena parte de la investigación acometida en los últimos diez años sobre neurociencia de la afectividad se ha centrado en la búsqueda de los sistemas cerebrales que subyacen bajo cada una de las emociones, valiéndose de disociaciones neuropsicológicas y de las técnicas de neuroimagen.

Una división común parte las emociones en positivas y negativas. El motivo discriminante estriba en el componente sensorial de la emoción: si produce placer, se dice que es una emoción positiva; si desagrado, una emoción negativa. Aunque a veces ante un mismo acontecimiento pueden darse, a un tiempo, sensaciones de gozo y dolor. Por ejemplo, la relación sexual puede considerarse positiva porque produce placer, pero puede considerarse también negativa si entra en conflicto con las convicciones morales del sujeto. En razón de si la emoción es positiva o negativa se activan diferentes sistemas cerebrales. Se ha investigado, en ese sentido, qué mecanismos cerebrales participan en un sistema de dolor/aversión y cuáles en un sistema de placer/recompensa. La red del dolor constaría del córtex cingulado anterior dorsal, la ínsula, el córtex somatosensorial, el tálamo y la materia gris periacudúctea. Por su parte, la red de recompensa la integrarían el área tegmental ventral, el estriado ventral, el córtex prefrontal ventromedial y la amígdala. Se disputa si la oposición entre emociones positivas y emociones negativas se funda en la asimetría esférica funcional; en el hemisferio izquierdo habría un centro para los sentimientos positivos, y en el derecho, otro para los sentimientos negativos. En particular, se habla de la hipótesis del hemisferio derecho, según la cual todos los mecanismos relacionados con la emoción se hallarían más lateralizados en ese hemisferio.

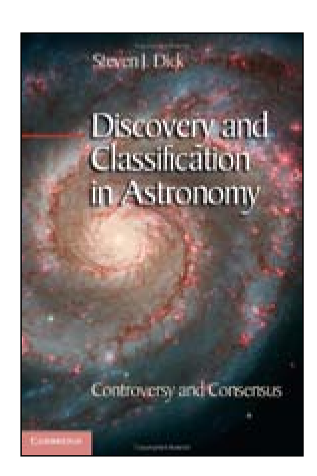
Un ejemplo típico de otra distinción, basada en el tipo de objeto que desencadena la emoción, corresponde a las emociones autorreflexivas: vergüenza, perturbación, culpa u orgullo. Propio de esta categoría es el que el objeto de la emoción es el yo, no el episodio desencadenante. Uno puede sentirse avergonzado de uno mismo y sentir miedo de una serpiente. Parece indicado que en este contexto se estudien también emociones tales como la humillación, la gratitud, la envidia y los celos. Estas emociones autoconscientes (o morales) han recibido creciente atención en neurociencia de la afectividad. Se habla también en este caso de emociones sociales y sirven para regular la conducta social.

Ciertas emociones (interés, confusión, sorpresa, apercibirse) se relacionan con el conocimiento y el aprendizaje, motivo por el cual se denominan a veces emociones epistémicas. Así, la emoción «interés» desempeña un papel clave en la exploración, el aprendizaje, el desarrollo del conocimiento y el desarrollo de la capacidad en muchos dominios. Por su parte, las emociones se desencadenan típicamente cuando las personas se entregan a la contemplación de obras de arte o se extasían ante fenómenos de la naturaleza. Cuasiemociones se supone que son los sentimientos aflorados en las intrigas de la ciencia ficción y en la creación literaria o cinematográfica. Se produce entonces la paradoja de la ficción, cuando el monstruo que aparece en la pantalla provoca un sentimiento de miedo parecido al que se presenta cuando nos hallamos ante un peligro real.

El período que resultó determinante para la génesis y el desarrollo de las ciencias de la afectividad fue la segunda mitad del siglo XIX. La mayoría de los modelos pueden retrotraerse a esa época y a los escritos de Darwin, Dewey, Irons, James, Lange, Spencer y Wundt, por citar solo algunos de los estudiosos más notables. De hecho, la exposición neurocientífica clásica de las emociones que consideramos hoy clásicas (la existencia del sistema límbico) constituyó una reacción a una exposición muy controvertida y específica de las emociones, la teoría de James-Lange. Esta tesis se fundaba sobre el marco general que era habitual en las teorías propuestas por James (1884) y Lange (1885), para quienes las emociones eran cambios corporales subsecuentes a la percepción de un hecho excitante; en concreto, nuestra sensación de dichos cambios conforme van aconteciendo definía la emoción. En 1894, Exner sugería un centro de procesamiento de la aversión en el cerebro; en el mismo año, Freud avanzaba la teoría de la red neuronal sobre la memoria emocional y en 1907 Waynbaum introducía el centro cerebral de las emociones.

La teoría neurocientífica de Cannon en 1927 sobre las emociones apuntaló las bases para los debates contemporáneos sobre el respectivo rol del sistema nervioso central y del sistema nervioso periférico en las emociones. En 1937, Papez produjo la primera propuesta explícita de un circuito cerebral como mecanismo de la emoción, agregándole el hipocampo y el córtex cingulado. En 1952, McLean propuso un concepto que ejerció suma influencia en el campo: el sistema límbico; incluyó la amígdala en este sistema. Sin embargo, la idea de sistema límbico como base unitaria del cerebro emocional ha recibido críticas duras. Aunque la teoría talámica, el circuito de Papez y el sistema límbico han dejado de ser considerados modelos predominantes de la emoción basados en el cerebro, tuvieron una influencia crítica en lo que se denominó neurociencia afectiva unos decenios posteriores.

—*Luis Alonso*



DISCOVERY AND CLASSIFICATION IN ASTRONOMY. CONTROVERSY AND CONSENSUS

Por Steven J. Dick. Cambridge University Press; Cambridge, 2013.

Epistemología y astronomía

Estructura metacientífica de descubrimientos y clasificaciones

Apoyado sobre los fundamentos establecidos por Martin Harwit en *Cosmic discovery: The search and heritage of astronomy*, hace más de 30 años, Steven J. Dick nos ofrece en el libro de cabecera una documentada exposición histórica de la astronomía observacional desde comienzos del siglo XVII, al tiempo que se adentra en el terreno de la filosofía de la ciencia para arrojar luz sobre los conceptos de descubrimiento y clasificación, motores del desarrollo de la disciplina. Descubrimiento y clasificación van de la mano. La clasificación ha resultado determinante para el desarrollo de la química (tabla

periódica), de la física (modelo estándar) y, sobre todo, de la biología (con sus cinco reinos y tres dominios). Aunque abarca desde la observación de los satélites de Júpiter, anillos de Saturno y cúmulos estelares hasta las nebulosas de William Herschel y los descubrimientos modernos de cuásares y púlsares, toma por caso paradigmático el asunto Plutón.

Harwit se había propuesto un doble objetivo: determinar qué campos de la astronomía tienen el mayor número de descubrimientos potenciales y explorar qué campos de la astronomía podrían propiciar los avances más inmediatos y las recompensas más prometedoras. Buceó en la historia para responder a tales cuestiones, tomando como eje de su inquisición la idea de descubrimiento. Dick reconoce también una deuda particular con Norwood Russell Hanson y Thomas Kuhn. El primero es conocido por sus *Patterns of discovery* (publicado originalmente en 1958, se tradujo al español en 1977), donde elaboraba su tesis central de observaciones cargadas de teoría: lenguaje de la observación y lenguaje de la teoría se encuentran inextricablemente entrelazadas, igual que se hallan entrelazados la interpretación histórica y la contemporánea de los fenómenos. Su ensayo póstumo «An anatomy of discovery», publicado en 1967 en *Journal of Philosophy*, constituye el punto de partida canónico del que han arrancado cuantos se han acercado a la cuestión. A Kuhn, famoso por sus paradigmas y revoluciones científicas, le debe la idea de que el descubrimiento es un proceso prolongado, según detalla en *The structure of scientific revolutions*. Lo cierto es que la mayor parte de la ciencia no se forja con revoluciones, sino con hallazgos. El descubrimiento constituye un proceso extenso y complejo, que no consiste solo en la detección, sino también en la interpretación y niveles diversos de comprensión subsiguiente a la interpretación.

El 24 de agosto de 2006, la Unión Astronómica Internacional (UAI) —la institución que determina la designación oficial de un cuerpo celeste— rebajaba el estatuto de Plutón, descubierto en 1930, a la categoría de planeta menor. Tal degradación, al tiempo que obligaba a corregir todos los manuales de astronomía, desencadenó un interesante debate metacientífico sobre el particular. La cuestión de Plutón puso de relieve que las clasificaciones, lejos de ser un asunto irrelevante, forman parte esencial de la ciencia, de manera muy significativa desde Herschel. Aparte de su descubrimiento de Urano en 1781 y de haber acuñado el término *asteroide* para la nueva clase de objetos hallada en 1801, el barrido de los cielos que realizó con sus grandes telescopios reveló un número elevado de nebulosas, que él percibía en diverso estado de desarrollo.

El descubrimiento de Plutón en 1930 no significó ninguna innovación radical, pues se le supuso perteneciente a la clase de los planetas. Después de todo, el hallazgo llegó tras una búsqueda deliberada a raíz de una predicción específica, predicción que hoy sabemos carente de fundamento. Tampoco el descubrimiento en 1978 de Caronte, la primera luna de Plutón, constituyó una nueva clase de objetos, sino que se limitó a añadir un miembro más a la clase de satélites cuyo establecimiento comenzó con el hallazgo galileano, Luna terrestre aparte, de las lunas de Júpiter. Ahora bien, al permitir el cálculo de la masa de Plutón, Caronte marcó el inicio de la degradación del estatuto planetario de aquel: con la simple aplicación de las leyes de Kepler para dos cuerpos en órbita, la masa resultante era de solo 1/400 de la masa de la Tierra y un diámetro mucho menor que el de nuestra Luna. James W. Christy se percató de que las imágenes de Plutón aparecían elongadas, mostrando un sutil alargamiento meridional en abril y un ligero alargamiento septentrional en mayo. ¿Tenía Plutón una luna? La existencia de Caronte, que así se llamó, quedó plenamente confirmada en 1980. En 2005, los astrónomos del Telescopio Espacial Hubble anunciaron el descubrimiento de otras dos lunas exteriores, llamadas Hydra y Nix, a las que se sumó un cuarto satélite en 2011 y un quinto en 2012.

A comienzos de los años noventa, el estatuto de Plutón empezó a tambalearse. Los astrónomos encontraron una variedad de objetos más allá de Neptuno, en una zona que dista entre 30 y 55 unidades astronómicas del Sol, conocida por cinturón de Kuiper o cinturón de Edgeworth-Kuiper. Algunos objetaban que por aquellas fechas no se sabía lo suficiente sobre el cinturón de Kuiper para afirmar que Plutón era un cuerpo de ellos, desde el propio diámetro: mientras que el de Plutón se acercaba a los 1200 kilómetros, el tamaño de 1992 KB1 se estimaba en solo 200 kilómetros. Pero en julio de 2005 se produjo un hecho decisivo. Michael Brown, Chad Trujillo y David Rabinowitz anunciaron el descubrimiento de 2003 UB313, un cuerpo transneptuniano que denominaron Xena y recibió luego el nombre oficial de Eris. Este parecía ligeramente mayor que Plutón en extensión y masa. A los pocos meses, Brown y sus colegas anunciaron que Eris tenía un satélite, más tarde denominado Disnomia. ¿Era Eris el décimo planeta o acaso Plutón no era un planeta? Y, puesto que se supo pronto de la existencia de numerosos objetos similares allende Plutón, ¿qué estatuto había que concederles?

Intervino la UAI. Owen Gingerich distinguía dos tipos de aproximaciones a la definición de *planeta*: dinamicistas y estructuralistas. Los primeros se centraban en las interacciones entre Plutón y otros cuerpos; los segundos atendían a la naturaleza física de Plutón y de otros objetos similares. Era obvio que se necesitaba un discriminante físico claro, no una línea divisoria artificial. Tras no pocos tanteos, se llegó a la siguiente conclusión: planeta es aquel cuerpo celeste que gira en órbita alrededor del Sol, presenta masa suficiente para que su autogravedad venza las fuerzas de cuerpo rígido, de suerte que adquiera una forma de equilibrio hidrostático (casi redonda) y encuentre libre la vecindad inmediata de su órbita. Había ocho planetas: Mercurio, Venus, la Tierra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno. Se concluía también que un planeta enano es un cuerpo celeste que gira en órbita alrededor del Sol, tiene masa suficiente para que su autogravedad venza las fuerzas de cuerpo rígido, de suerte que adquiera una forma de equilibrio hidrostático (casi redondeada), pero no se halle libre la vecindad de su órbita ni sea un satélite. Por fin, el resto de los objetos, exceptuados los satélites, se denominarán «cuerpos menores del sistema solar». La UAI resolvió que Plutón era un planeta enano, de acuerdo con la definición antedicha. Y al poco establecería que todos los planetas enanos con órbita transneptuniana se denominarían «plutoides». Integraban esa categoría Plutón, Haumea, Makemake y Eris.

Teniendo delante semejante y rica historia de una clase de objetos, podemos imaginarnos qué cabe esperar de la revisión histórica de otras clases de objetos astronómicos descubiertos a lo largo de los últimos 400 años: planetas, estrellas y galaxias. Los dos primeros son conocidos desde la antigüedad, habida cuenta de que uno de los aspectos más obvios del firmamento nocturno es que

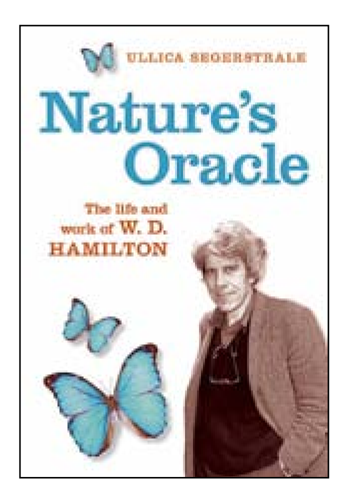
los planetas («errantes», en griego) se distinguen de un fondo de estrellas fijas. El dominio de las galaxias no quedó definitivamente acotado hasta la obra de Edwin Hubble en los años veinte del siglo pasado. Las lunas de Júpiter y los anillos de Saturno constituyeron los primeros ejemplos de lo que se convertiría un lugar común en astronomía: «ver» no es siempre «conocer», ni «detección» implica «descubrimiento»; es decir, que el reconocimiento de una nueva clase de objeto astronómico puede ser una difícil tarea en la que intervengan muchos factores. Allende la órbita de Neptuno (descubierto en 1846), fueron apareciendo miles de objetos.

Si el descubrimiento del dominio de los planetas fue difícil, en el reino de las estrellas las dificultades se multiplicaron. Mientras que Plutón, que representaba la frontera del sistema solar conocido en 1930, se halla a unas 40 veces la distancia de la Tierra al Sol (40 unidades astronómicas), la estrella más cercana se halla unas 7000 veces más alejada. Mientras que un haz de luz procedente de Plutón tarda unas pocas horas en llegar a la Tierra, la luz de la estrella más cercana —que no fuera nuestro Sol— invierte 4,2 años.

Para determinar la verdadera naturaleza de una estrella se necesita conocer no solo su espectro, sino también su magnitud absoluta, a partir de la cual se determina su brillo o «luminosidad». Eso requiere un conocimiento de las distancias estelares, que tenían que determinarse a través de los movimientos propios o establecerse a través de paralajes trigonométricas. A lo largo de la segunda mitad del siglo XIX y primera mitad del siglo XX, el avance de la técnica posibilitó el descubrimiento de nuevas clases de estrellas. En un comienzo, se dispusieron de acuerdo con las peculiaridades de sus líneas espectrales, pero luego se ordenaron de acuerdo con su tamaño y luminosidad. Se corrieron así las primeras etapas hacia el descubrimiento de enanas y gigantes entre 1905 y 1913, supergigantes en 1917, subgigantes en 1930 y subenanas en 1939. Cada una de esas estrellas tiene su propia historia de descubrimiento y clasificación.

A diferencia de los reinos de los planetas y estrellas, observados aquellos en su andar errante sobre el fondo de estrellas fijas, el reino de las galaxias tenía que descubrirse. Algunos de sus miembros se habían detectado mucho antes de que se supiera de su existencia fuera del sistema solar. A simple vista, podían observarse Andrómeda y las Nubes de Magallanes. A principios del siglo XX reinaba todavía mucha inseguridad sobre la existencia real de objetos extragalácticos. Se suponía que el universo entero era nuestra galaxia. En el primer tercio de esa centuria, Hubble había clasificado las galaxias en tres o cuatro grupos. Distinguió también los primeros miembros del Grupo Local. Por los años treinta, el atlas galáctico de Shapley y Ames mostraba que el Grupo Local formaba parte, a su vez, del cúmulo de Virgo, que contiene más de un centenar de galaxias (hoy sabemos que son más de 2000), que abarcan más de 10 millones de años luz. En el meridiano del siglo, Gerard de Vaucouleurs reunía pruebas del Supercúmulo Local, que contenía al menos 50 cúmulos galácticos que abarcaban 110 millones de años luz, del cual nuestro Grupo Local no es más que un miembro apendicular. Treinta años más tarde se descubrió la estructura a gran escala del universo.

—Luis Alonso



NATURE'S ORACLE. THE LIFE AND WORK OF W. D. HAMILTON

Por Ullica Segerstrale. Oxford University Press; Oxford, 2013.

Darwin renovado

Cambio de perspectiva: del individuo al gen

William Donald Hamilton (1936-2000) desató dos nudos de la teoría de la evolución que se le habían resistido a Charles Darwin y a cuantos le siguieron durante más de un siglo: por qué los organismos se muestran altruistas en un mundo de sangrienta competición y por qué se encuentra tan extendida la reproducción sexual, pese a su doble coste. Le debemos también la regla que lleva su nombre, según la cual el altruismo no recíproco podría manifestarse allí donde se dieran mecanismos que asegurasen que el coeficiente de parentesco tendería a superar la razón coste-beneficio del acto altruista.

Genes egoístas, altruismo, selección de parentesco, son términos que ahora nos resultan familiares. Hoy no se cuestiona que lo que realmente importa en evolución no es la supervivencia del organismo animal, sino sus genes. Desde el punto de vista del gen, puede un organismo comportarse de manera altruista, si, con esa conducta, ayuda a los otros que portan copias de sus propios genes: a sus parientes. Tal fue la solución descubierta para resolver el problema que planteaba el altruismo a la teoría darwinista. ¿Por qué un ave avisa a los demás de la presencia de un depredador si de ese modo llama la atención de este con peligro de su vida? Darwin no encontró salida a esa cuestión. Hamilton la halló, de forma precisa y matemática. Con ello inició un cambio de paradigma en el neodarwinismo imperante.

Hamilton resolvería otros problemas y abriría nuevos caminos con sus trabajos sobre evolución de la sexualidad, proporciones entre sexos, coevolución del parásito y su huésped, elección del compañero sexual, cooperación entre no emparentados, dispersión, senescencia y evolución de la sociabilidad. Cedió a otros el mérito de poner nombres llamativos a sus propias ideas: «gen egoísta» en el caso de Richard Dawkins o «Reina Roja», en el de Matt Ridley. (En 1976 apareció el libro de Dawkins *The selfish gene*. Reconoce que las ideas desarrolladas allí

habían sido ya expuestas por Hamilton, Edward O. Wilson, Robert Trivers y John Maynard Smith.)

Hamilton nació en El Cairo, donde su padre trabajaba adscrito al Cuerpo de Ingenieros de Inglaterra. Este despertó en su hijo el interés por el razonamiento lógico y matemático como forma de aproximación a la realidad. Andando el tiempo, Hamilton construiría modelos visuales, cuyos mecanismos físicos imaginaba, una habilidad que permitió que otros biólogos eximios de formación técnica, como George Price y Maynard Smith, se percataran del alcance de sus propuestas. A los nueve años, sus padres le regalaron *Butterflies*, de E. B. Ford, que presentaba una breve introducción al neodarwinismo, teoría que recurría a la genética de poblaciones para explicar la evolución como cambio de frecuencias génicas en el seno de una población. El libro describía también la naturaleza de los pigmentos de las alas de las mariposas: melanina, carotenoides y flavonas.

Hamilton se formó en la Universidad de Cambridge. No se encontraba a gusto con un planteamiento excesivamente fisiológico de la biología, ni la evolución constituía un asunto que apasionara en Cambridge, aunque ningún profesor cuestionaba el supuesto de que los animales operaban en beneficio de la especie. Para el alumno recién ingresado supuso, sin embargo, todo un descubrimiento el libro de Ronald Aylmer Fisher *The genetical theory of natural selection*, que sacó de la biblioteca de St. John's College. Hamilton estudió botánica, zoología, fisiología y matemática entre 1957 y 1959; optó también por la genética y, en particular, el enfoque matemático de esta que le proporcionaba la obra de Fisher. En el último curso de carrera, para cumplir la praxis investigadora, quedó asignado a Anthony Edwards, discípulo de Fisher, quien estaba escribiendo su tesis doctoral sobre la proporción entre sexos.

Terminado su período de formación en Cambridge, se le ofrecen dos opciones. Encontrar una plaza para alumnos de doctorado en un departamento de genética era una. Obtener un diploma de capacitación pedagógica y convertirse en profesor de segunda enseñanza, la otra. Muchos científicos de primera línea habían seguido ese camino, como Ronald Fisher y David Lack. Además, la enseñanza, menos dura que la genética, le dejaría tiempo para seguir desarrollando su pensamiento sobre el altruismo.

Hamilton estaba convencido de que había un fundamento genético para el altruismo, por contraintuitivo que ese comportamiento pareciera en relación con la eficacia biológica (éxito reproductor) del individuo. ¿Por qué habría de comportarse un animal como si redujera su eficacia biológica poniéndose él mismo en peligro (por ejemplo, emitiendo una señal de alarma) o absteniéndose de la reproducción (como las obreras de muchos insectos sociales)? ¿Por qué una abeja aguijonea a los invasores del panal y pierde su propia vida? Esos tipos de conducta no confieren al animal ninguna ventaja evolutiva.

Ese rasgo contraintuitivo, cavilaba Hamilton, podía difundirse bajo determinadas condiciones. Bastaba simplemente que los beneficios de la acción altruista no recayeran al azar en cualesquier miembro de la población, sino sobre individuos que estuvieran genéticamente emparentados con el donante. El ave que da la voz de alarma puede sacrificarse en pro de sus parientes, lo que obligaba a replantearse el concepto de eficacia biológica: no solo contaba la del individuo, sino la del grupo de familiares que portaban los genes del individuo.

Su propuesta de trabajo en esa línea no fue bien recibida en Cambridge. Se le sugirió que se encaminase hacia el departamento de demografía de la Escuela de Economía de Londres. A finales de 1960, atendiendo a la naturaleza genética del proyecto de Hamilton, se dispuso que se registrara parcialmente en el University College, de Londres, y tuviera un supervisor de la Escuela de Economía. Se propuso encontrar un marco teórico que explicara por qué la constitución genética determinaba el comportamiento social. Empezó por considerar tipos de pares de parientes, para ir generalizando hasta convertirlo en principio general. (El parentesco genético entre pares de individuos emparentados puede calcularse como la probabilidad de que ellos hayan heredado una copia del mismo gen. Por ejemplo, la mitad de los genes de hermanos son, en promedio, idénticos para el descendiente común; lo mismo ocurre con progenitor e hijo. La proporción es de un octavo entre primos hermanos y de 1/32 para primos segundos. De ese modo, el coeficiente de parentesco respectivo será 1/2, 1/8, 1/32, etcétera.

Así fue madurando el artículo que solucionaría la aporía del altruismo en una evolución que primaba la eficacia biológica. Apareció primero, en 1963, un resumen del trabajo en la revista *The American Naturalist*, con el título «The evolution of altruistic behavior». Antes lo había enviado a *Nature*, a sugerencia de su supervisor Cedric Smith. Recibió la respuesta negativa del editor, que lo consideraba demasiado específico, y le aconsejaba una revista de psicología o sociología. En *Nature* no percibieron el carácter genético del artículo ni la potencia intelectual del mismo. En él podía leerse la regla de Hamilton, resumida en la ecuación $r > c/b$, donde r simboliza el coeficiente de parentesco, c representa el coste que supone para el donante y b indica el beneficio que comporta para el receptor. En virtud de dicha regla, la selección de parentesco provoca que los genes incrementen su frecuencia cuando el parentesco genético de un individuo multiplicado por el beneficio obtenido por el receptor es mayor que el coste reproductor del actor.

Titulado «The genetical evolution of social behavior», el artículo desarrollado, hito de su carrera científica, fue publicado en el *Journal of Theoretical Biology*, en 1964. Constaba de dos partes, consagrada la primera a la deducción matemática del concepto de eficacia biológica inclusiva y la segunda a ejemplos y análisis. Hamilton buscaba un principio general similar al teorema fundamental sobre selección natural de Fisher. Este famoso teorema establecía que la eficacia biológica, en promedio, continuaría incrementándose. Al poner sobre el tapete la eficacia biológica inclusiva, destaca dos aspectos revolucionarios: uno, la desconexión de un gen respecto del individuo en cuyo cuerpo habita el gen (porque los familiares pueden portar también copias de dicho gen); dos, el interés de un gen no es necesariamente el mismo que el interés de su portador. Utiliza el coeficiente de parentesco de Sewall Wright entre dos familiares como medida de la verosimilitud de que porten réplicas de un mismo gen heredado de antepasados comunes.

Hamilton distinguía cuatro tipos de conductas sociales, de acuerdo con un doble criterio: si el agente A inflige un daño al agente B o le produce un beneficio. La conducta que entraña un beneficio para uno mismo y daño para los demás se llama egoísmo; la que comporta daño para mí mismo y beneficio para los demás se llama altruismo. La que causa beneficio a uno y a otro se denomina cooperación. Y la que causa daño a sí mismo y otros, estupidez. Adviértase que aquí el compor-

tamiento social se clasifica estrictamente en términos del efecto que la eficacia biológica de un individuo ejerce sobre la eficacia biológica de otro. Se trata de un altruismo de comportamiento; concierne a las consecuencias de una acción, no a su motivación.

Los dos proyectos subsiguientes a esos artículos de 1964 versaban sobre la proporción entre sexos y la senescencia, que él consideraba interrelacionados con la eficacia biológica inclusiva. La senescencia era una de las grandes cuestiones planteadas por Fisher en *The genetic theory of natural selection*. Para él, la tasa de mortalidad en el hombre suele tomar un curso inverso a la curva del valor reproductivo. Pensaba que el valor reproductivo de un individuo comenzaba a decaer conforme aumentaba la mortalidad. Pero Hamilton halló que no existía tal nexo necesario entre sexo y muerte. Y desarrolló modelos para demostrar que la senescencia, en cuanto tal, resultaba inevitable, al margen del valor reproductivo. Ningún animal podía escapar a ella. En 1966 publicó su teoría de la senescencia en el *Journal of Theoretical Biology* («The moulding of senescence by natural selection»), donde acotaba los factores principales de la misma. Hamilton comprobó que la proporción ideal entre machos y hembras no era de 1:1, según propusiera Fisher. En las condiciones de endogamia se producía a menudo un sesgo favorable a las hembras 9:1. Publicó en *Science* sus conclusiones sobre la proporción entre sexos el año 1967 con el título «Extraordinary sex ratios». En su artículo se hace patente la fuerza real de la selección natural en su capacidad de aportar predicciones cuantitativas.

En 1972 revisó con nuevos datos, en *Annual Review of Ecology and Systematics* («Altruism and related phenomena, mainly in social insects»), su tesis sobre la eficacia biológica inclusiva. Refinó la regla de Hamilton sustituyendo el coeficiente de parentesco por el coeficiente de regresión de parentesco, que le otorgaba mayor generalidad. Iniciaba el artículo preguntándose: «¿En qué sentido puede el autosacrificio de la hormiga estéril considerarse lucha por la existencia o empeño por maximizar el número de la progenie?». Sugirió más tarde que la cultura contaba con un soporte genético. Fenómenos que reputamos exclusivamente culturales esconden un origen biológico, como la xenofobia. Lo relacionaba con su concepto de niveles de selección; no había una unidad singular de selección, sino que se operaba en muchos niveles a un tiempo. Otros campos que roturó fueron el de la influencia del hábitat en la convergencia funcional pese a la disparidad filética y el de la dispersión de las especies.

—Luis Alonso

Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Mayo 1964

El hombre primitivo

«El paleontólogo británico L. S. B. Leakey ha descubierto en África huesos que atribuye a los humanos más primitivos, para los que ha propuesto el nombre de *Homo habilis*. Hasta ahora se creía que el primer hombre era *Pithecanthropus*, que vivió hace unos 500.000 años. Los huesos descubiertos por Leakey y sus colaboradores parecen remontarse hasta hace 1,8 millones de años. Leakey describe que *H. habilis* caminaba derecho sobre sus pies, casi como los humanos modernos, y poseía unas manos considerablemente diestras. El paleontólogo ha anunciado también que ha abandonado su primera opinión según la cual *Zinjanthropus*, un humanoide cuyos huesos halló en África en 1959, se halla en la línea evolutiva que dio lugar al hombre.»



Mayo 1914

Un futurista célebre

«*The world set free* ("El mundo liberado"), de H. G. Wells (E. P. Dutton & Co, Nueva York, 1919). Este último libro del señor Wells reúne en sus páginas el magnífico vuelo imaginativo que nos ofreció con *La máquina del tiempo* y *La guerra de los mundos*, y también demuestra la aguda percepción sociológica que nos brindó con *El nuevo Maquiavelo* y otras obras sucesivas. La bomba atómica que tan importante papel desempeña en la narración, si bien constituye una creación del señor Wells, bien podría considerarse inspirada en *La interpretación del radio* (1909) de Frederick Soddy. Aduce Wells que, dado que las sustancias radiactivas están continuamente desintegrándose y desprendiendo energía con ello, podrían conseguirse unos resultados tremendos si la desintegración tuviera lugar con una rapidez explosiva. Como buen conocedor de la ciencia, nos presenta su bomba atómica como algo tan definido y terminado que casi nos convence de que existe.»

Preparando la guerra

«Una autoridad nada menos que de la solvencia del doctor Hugo Eckener [de Luftschiffbau Zeppelin] es responsable de unas asombrosas revelaciones sobre un nuevo tipo de puntería aérea, el bombardeo sobre el suelo tal como lo efectúan los modernos zepelines. Desde la seguridad de una altura de 1500 metros se lanzaron bombas pesadas al interior de círculos de solo 4,5 metros de diámetro señalados por boyas en las aguas del Elba, con lo que se demostró que también podrían lanzarse al interior de las chimeneas de los buques de guerra. Las pruebas realizadas en tierra indican que desde la misma altura podría reducirse a escombros una estación de ferrocarril con cuatro de esas bombas.»

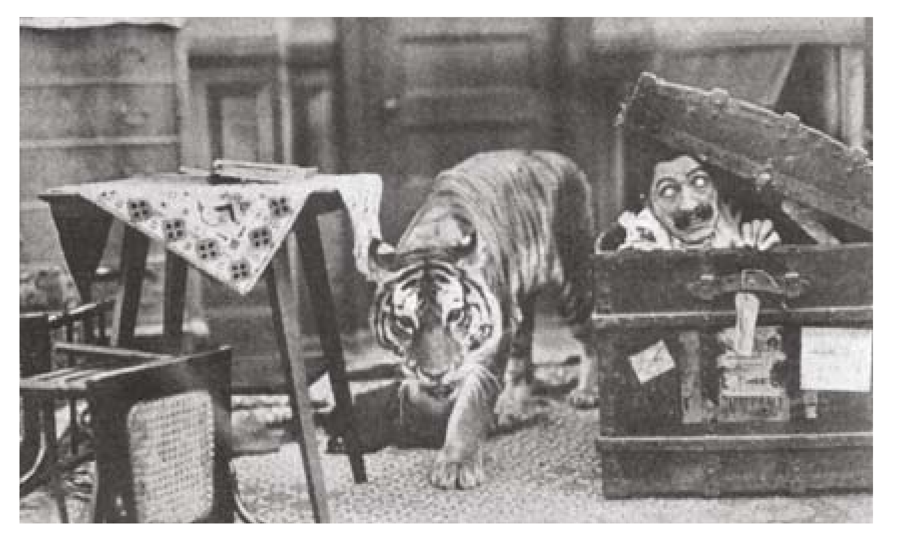
A los tres meses estallaba la Primera Guerra Mundial; poco después, los zepelines bombardeaban Lieja y Amberes.

Barcos para el ocio

«Pocos años atrás, cada vez que se botaba el "mayor" vapor de todos, solía afirmarse que esa embarcación había llegado al límite del tamaño. Hoy ya no oímos tales pronósticos. Hace menos de un año que arribó al puerto de Nueva York el vapor *Imperator*, de la Hamburg-America Line, el primer barco que rebasaba los 270 metros de longitud con un desplazamiento de 52.000 toneladas. Esta semana ve la entrada del *Vaterland*, cuya longitud excede en 12 metros la del *Imperator*.»

Animales actores

«Animales salvajes ambiciosos y fuertes que hasta ahora solo podían aspirar a la fama en los circos y en los espectáculos de variedades han descubierto un nuevo campo donde ejercitarse en sus talentos. Cerca de Fort Lee (Nueva Jersey) se ha abierto para ellos una nueva escuela dramática. Paul Bourgeois, un joven domador francés, tomó la iniciativa de enseñar a los habitantes de la selva a aparecer ante las cámaras de "cine" [*véase la fotografía*].»



CUANDO LOS ANIMALES ACTÚAN: Una escena de los primeros días del cine, 1914.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CX, N.º 22, 30 DE MAYO DE 1914



Mayo 1864

El lado oscuro de la fama

«El gran poeta inglés Alfred, Lord Tennyson, está sumamente irritado por la curiosidad de los intrusos. De vez en cuando se encuentra a extraños sentados en el jardín o husmeando por las ventanas, vagando tranquilamente por sus terrenos. Mientras mantenía una conversación privada una vez con su familia en el jardín, al elevar casualmente la vista descubrió a un osado turista británico encaramado en las ramas de un árbol que tomaba notas mentales de su conversación. El señor Tennyson se ha visto obligado a construir vallas, alzar terraplenes, poner guías a la vegetación y, de hecho, medio fortificar su casa.»

EVOLUCIÓN

La aparición del humano depredador

Kate Wong

Durante décadas los antropólogos han discutido sobre cuándo y cómo se convirtieron nuestros antepasados en unos cazadores experimentados. Hallazgos recientes arrojan una imagen sorprendente.



MEDICINA

La revolución del ARN

Christine Gorman y Dina Fine Maron

Considerada durante largo tiempo una simple molécula para el mantenimiento celular, el ARN está abriendo nuevos caminos terapéuticos.



CAMBIO CLIMÁTICO

Falsas esperanzas

Michael E. Mann

El aumento de la temperatura global podría haberse estabilizado, pero todavía se cierne sobre el planeta una crisis climática.



NUEVA SERIE SOBRE FÍSICA DE PARTÍCULAS

La supersimetría y la crisis de la física

Joseph Lykken y Maria Spiropulu

Durante décadas los físicos han trabajado en una bella teoría que prometía conducirnos a una comprensión más profunda del mundo cuántico. Ahora se encuentran en una encrucijada: o demuestran que es correcta el año próximo o tendrán que afrontar un cambio de paradigma.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Carlo Ferri
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

SENIOR VICEPRESIDENT AND EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Seth Fletcher, Christine Gorman, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Jason Mischka
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
VICE PRESIDENT AND ASSOCIATE PUBLISHER, MARKETING AND BUSINESS DEVELOPMENT Michael Voss

DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
NEW PLANNING
Javier Díaz Seco
Tel. 607 941 341
jdiazseco@newplanning.es

Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	65,00 €	100,00 €
Dos años	120,00 €	190,00 €

Ejemplares sueltos: 6,50 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Alberto Ramos: *Primera señal de ondas gravitacionales primigenias*; Sara Arganda: *El nuevo siglo del cerebro*; Yago Ascasibar: *Galaxias enanas en la red cósmica*; Fabio Teixidó: *Las rocas más antiguas y Foro científico*; Andrés Martínez: *El difícil trance del parto humano, Reconocimiento facial en insectos y Apuntes*; Bartolo Luque: *Nunca digas nunca*; Olivia Potel: *Terapia génica, segunda parte*; Teresa Pinel: *Raíces musulmanas del Renacimiento*; Marián Beltrán: *¿Por qué las buenas ideas bloquean otras mejores?*; Juan Pedro Campos: *Apuntes*; Alfredo Marcos: *Filosofía de la ciencia*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN 0210136X Dep. legal: B-38.999-76

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600 08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España